

L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

DU MÊME AUTEUR

(A LA MÊME LIBRAIRIE)

- Les Industries électrochimiques.** — Fabrication électrochimique des métaux et de leurs composés. — Chlore, alcalis et composés du chlore. — Ozone. — Métaux alcalins et alcalino-terreux, métaux usuels, cuivre et nickel, métaux rares ou destinés à des usages spéciaux. — Composés organiques. — In-8° de 800 pages et 332 figures. 25 fr.
- Le Carbone et son industrie.** — Propriétés générales des carbones. — Diamant : gisements, applications. — Mode de formation dans la nature et essais de reproduction. — Graphite et charbons électriques. — Carbones amorphes : charbon de bois, noirs industriels, coke, charbon de cornue. — La houille et ses différentes variétés. — Tourbe : utilisation industrielle. — Lignite. — In-8° de 760 pages, 129 figures et une planche hors texte. 25 fr.
- La fabrication électrochimique de l'acide nitrique et des composés nitrés à l'aide des éléments de l'air.** — Importance industrielle et économique des matières azotées. — Considérations sur le rôle économique de l'électricité dans la préparation électrochimique de l'acide nitrique. — Description des procédés actuels utilisés dans cette fabrication. — Applications des nitrates électrochimiques. — Cyanamide calcique. — Nitrifières à haut rendement. — In-8° de 115 pages et 52 figures (2^e édition) 4 fr. 50
- Les Métaux spéciaux et leurs composés métallurgiques industriels.** — Manganèse, chrome, silicium, tungstène, molybdène, vanadium. — Production industrielle et électrométallurgique, utilisation. — Alliages de ces métaux avec les métaux usuels, rares et spéciaux. — In-8° de 600 pages et 200 figures. 18 fr.
- Les Pierres précieuses.** — Propriétés caractéristiques et procédés de détermination. — Description des gemmes aluminieuses, silicatées, etc. — Etat naturel, exploitation. — Production artificielle. — Utilisation. — Lois et règlements. — Bibliographie. — In-4° de 500 pages, 300 figures et 24 planches hors texte dont 8 en couleurs. 30 fr.
- Les Fours électriques de laboratoire.** — Analyses et incinérations. — Fusions et volatilisations. — Essais et recherches chimiques, métallurgiques et céramiques. — Trempe et traitements divers des métaux et alliages. — In-8° de 80 pages avec 60 figures. 4 fr. 50
- Les Industries du Four électrique.** — Fours électriques industriels : classification, emplois généraux. — Fours de fusion et de réduction. — Électrodes. — Préparation des métaux au four électrique. — Électrosidérurgie. — Aciers spéciaux. — Ferro-alliages. — Zinc. — Aluminium. — Alliages électrothermiques. — Carbures, siliciures, carborundum. — Acide nitrique et dérivés nitrés. — Produits spéciaux du four électrique : abrasifs, verre et quartz fondus, produits chimiques et métallurgiques divers, produits réfractaires, graphite, etc. — Travail électrothermique des métaux et alliages. — In-8° de 550 pages avec 300 figures. (En préparation.)

Majoration temporaire de 20 p. 0/0 sur les prix ci-dessus.

JEAN ESCARD

INGÉNIEUR CIVIL

LAURÉAT DE L'INSTITUT ET DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

L'ALUMINIUM

DANS

L'INDUSTRIE

MÉTAL PUR

ALLIAGES D'ALUMINIUM

PARIS (VI^e)

H. DUNOD ET E. PINAT, ÉDITEURS

47 et 49, Quai des Grands-Augustins

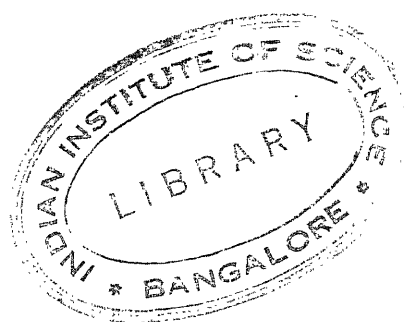
1918

Tous droits de reproduction, traduction et adaptation réservés pour tous pays, y compris la Russie.
Copr. by Dunod et Pinat 1918.

780

684.7.2.

111



INTRODUCTION

L'industrie de l'aluminium intéresse à la fois les métallurgistes, les chimistes, les constructeurs et les mécaniciens. Pur ou à l'état d'alliage, il présente des qualités qui, réunies, n'appartiennent à aucun autre métal; ces qualités seront étudiées dans ce livre avec détails, de même que les applications, très nombreuses et très diverses, dont il est susceptible. Sa préparation s'effectue actuellement par un procédé relativement simple et il n'est pas douteux que les emplois du métal pur se généraliseront encore davantage lorsque les minerais d'aluminium susceptibles de traitement se seront multipliés.

L'aluminium est, en effet, l'un des éléments les plus répandus de l'écorce terrestre : il entre dans la composition d'un grand nombre de roches, à côté du silicium et du calcium, et l'argile elle-même n'est autre chose qu'un silicate d'aluminium. Malheureusement, l'extraction de l'alumine de ces diverses substances en vue de l'isolement du métal est une opération complexe en raison de leur stabilité; elle constitue actuellement la principale difficulté d'application des méthodes proposées ou essayées. Il n'est pas douteux cependant que, dans un avenir plus ou moins prochain, ces difficultés seront aplanies et que l'aluminium sera, par son faible prix de revient, un des concurrents les plus sérieux des métaux usuels.

Cependant l'aluminium pur ne peut se prêter à tous les usages en raison de certaines imperfections mécaniques ; aussi a-t-on cherché à suppléer à ces dernières en l'additionnant de quantités plus ou moins importantes d'autres métaux, tels que le cuivre, le nickel, le magnésium, le tungstène, etc., qui améliorent ses qualités. Le but poursuivi actuellement par tous les métallurgistes est d'obtenir un alliage aussi résistant que l'acier et aussi léger que l'aluminium pur : il doit se laisser travailler, donner des pièces coulées parfaitement nettes, pouvoir être aisément forgé, laminé, embouti, comprimé sans difficulté tout en conservant les qualités de résistance et d'élasticité nécessaires. Tel est le problème à résoudre. C'est un tel alliage qui est appelé à prendre place désormais dans la construction mécanique générale. Bien que cet alliage ne soit pas encore trouvé, les efforts tentés ont tracé aux techniciens la voie à suivre pour aboutir au succès ; certains alliages d'aluminium semblent du reste presque réaliser les desideratas formulés par les industriels.

A ces divers titres, l'aluminium intéresse la France au plus haut point. Non seulement, en effet, c'est notre pays qui en est le producteur le plus important d'Europe, mais c'est aussi sur notre sol que se trouvent les gisements de bauxite (principal minéral d'aluminium) les plus nombreux et les plus riches. Ajoutons que c'est à un Français, Sainte-Claire Deville, que revient d'avoir préparé et étudié pour la première fois ce métal (1854). C'est également à un Français, Héroult, que l'on doit les méthodes véritablement industrielles et pratiques qui ont vulgarisé la fabrication de l'aluminium et développé ses applications.

Le lecteur se rendra compte, à la lecture de cet ouvrage, combien l'industrie de l'aluminium a pris d'extension depuis

vingt-cinq ans, époque à laquelle les ingénieurs le regardaient simplement comme un zinc de mauvaise qualité. Il jugera de la multiplicité des efforts tentés et des résultats obtenus tant pour réaliser la production du métal pur que pour la production facile et économique des alliages légers. Ces derniers, par leurs caractères différents de constitution micrographique, d'homogénéité, de légèreté, de propriétés mécaniques et physiques, de résistance chimique, se prêtent à des usages différents et variés. On peut dès à présent prévoir le moment où l'alliage léger idéal, réunissant les qualités énumérées précédemment, fera aussi son apparition dans l'industrie. Ce jour-là, l'aluminium remplacera économiquement sur le marché les métaux en alliages d'application courante tels que le fer, le cuivre, le zinc, les laiton et les bronzes.

JEAN ESCARD.

L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

CHAPITRE PREMIER

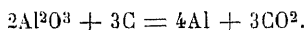
PROCÉDÉS DE FABRICATION

Dans la description du procédé courant de fabrication de l'aluminium, nous passerons sous silence les nombreux essais tentés par les savants et les industriels qui, dans ces cinquante dernières années, se sont occupés de la question. Il serait injuste cependant de ne pas rappeler les noms et les travaux de Sainte-Claire Deville (1834-1857), Cowles (1886-1892) et Minet (1887-1889). Ce dernier a été appelé à juste titre le « père de l'aluminium », bien que son procédé, très étudié, n'ait pas eu les résultats espérés et n'ait pu fonctionner industriellement. Le procédé actuellement utilisé dans la plupart des usines de production est celui d'Hérault, qui date de 1886 et qui, sous une forme très peu modifiée, est encore presque universellement appliqué industriellement aujourd'hui.

Principe du procédé industriel. — Le procédé consiste dans l'électrolyse de l'alumine Al_2O_3 dissoute dans un bain de cryolithe en fusion. Cette électrolyse s'effectue dans un four électrique revêtu intérieurement de charbon communiquant avec le pôle négatif d'une source d'énergie électrique extérieure; des électrodes de charbon, mobiles verticalement, plongent dans le mélange liquide et communiquent avec le pôle positif de la source d'énergie électrique. La chaleur nécessaire pour fondre et maintenir en fusion les substances introduites dans le four est fournie par le courant lui-même sans chauffage extérieur. La quantité d'énergie néces-

saire à cette double opération étant très importante, c'est seulement par l'emploi des chutes d'eau qu'on peut arriver à un rendement économique intéressant. Aussi la plupart des usines à aluminium sont-elles installées dans les pays de montagnes où la force motrice revient ainsi à meilleur compte.

La formation d'aluminium a son origine, d'après la plupart des techniciens, dans l'alumine; il prend naissance aux dépens de celle-ci par scission de la molécule. L'aluminium, mis en liberté à l'électrode négative, se rassemble au fond de la cuve, tandis que l'oxygène, libéré à l'électrode positive, brûle le carbone de cette dernière et forme de l'oxyde de carbone; ce gaz se consume aussitôt au contact de l'air, de sorte que sa transformation en acide carbonique est complète. On aurait la réaction suivante :



Cependant, en pratique, la réaction est un peu plus complexe et elle est en rapport avec le pourcentage des matières introduites dans le four. C'est ainsi que lorsque la teneur du bain en alumine descend au-dessous d'un certain chiffre, la cryolithe (fluorure double d'aluminium et de sodium, $\text{F}^6\text{Al}^2 + 6\text{FNa}$) s'électrolyse à son tour partiellement : à l'anode, on observe alors un dégagement de gaz fluorés et, à la cathode, il peut se déposer du sodium dont la présence nuit beaucoup, comme on le sait, aux propriétés de l'aluminium.

Pour supprimer toute action secondaire, on doit donc veiller à la constance de la composition du bain. On compense les pertes en ajoutant, à intervalles de temps suffisamment rapprochés, de l'alumine et, au besoin, de la cryolithe. En outre, la pratique a montré que l'emploi de certains fondants (fluorure de calcium, fluorure d'aluminium, chlorure de sodium) était essentiel. Ce sont ces fondants, dont la nature et la proportion varient suivant les usines, qui différencient surtout les modes d'obtention de l'aluminium des diverses sociétés s'occupant de cette industrie.

L'opération comprend deux phases principales : le *traitement du minerai*, pour l'extraction de l'alumine qu'il est nécessaire d'obtenir dans le plus parfait état de pureté possible, et la *préparation de l'aluminium*. Le minerai universellement employé est la bauxite, qu'on traite généralement dans des usines spéciales situées souvent

au voisinage même des gisements, mais souvent aussi à plusieurs centaines de kilomètres des usines métallurgiques où s'effectue l'extraction du métal. Cette distance est, comme nous l'avons vu, imposée par l'absence des forces naturelles à proximité des mines de bauxite actuellement connues et exploitées.

I. — Matières premières.

Les matières premières essentielles à la production de l'aluminium dans le four électrique sont : la *bauxite*, d'où est extraite l'*alumine*, la *cryolithe* et les divers *fondants* employés au cours de l'opération, enfin les *électrodes de charbon* dont l'usure est relativement élevée.

Bauxite. — La *bauxite* est un hydrate d'alumine impur correspondant à la formule $(Al, Fe)^2H^3O^3$ et qu'on rencontre surtout, en France, dans les départements du Var, des Bouches-du-Rhône, de l'Hérault, de l'Ariège et du Gard. Il en existe aussi des gisements plus ou moins importants dans la Géorgie et l'Arkansas. Elle renferme environ 60 % d'alumine Al^2O^3 , bien qu'elle en contienne parfois jusqu'à 80 %, de 2 à 10 % de silice SiO^2 , de 10 à 25 % de sesquioxyde de fer Fe^2O^3 , plus de 10 à 15 % d'eau et de 1 à 2 % d'acide titanique.

Les bauxites se subdivisent en *bauxites blanches*, où l'impureté prédominante est la silice, et en *bauxites rouges* qui contiennent une assez forte proportion de sesquioxyde de fer. Cette distinction n'a cependant rien d'absolu, car on connaît des bauxites blanches qui sont à la fois pauvres en oxyde de fer et en silice ; c'est le cas de certains minerais américains qui se rapprochent, d'ailleurs, plus de la gibbsite que de la bauxite.

Les bauxites blanches sont difficiles à purifier ; aussi utilise-t-on généralement les bauxites rouges, malgré leur pourcentage élevé de Fe^2O^3 . Dans cette fabrication, on admet couramment jusqu'à 16 à 17 % de sesquioxyde de fer ; quelques usines traitent même des bauxites à 25 % de ce composé. La teneur en alumine ne doit pas s'abaisser au-dessous de 57 % ni celle en silice être

supérieure à 3 $\frac{0}{0}$. Pour arriver aux proportions voulues, on procède par mélange de minerais riches et de minerais impurs. Les différences en plus ou en moins donnent lieu à des primes ou à des pénalités dont le taux varie entre 0 fr. 20 et 0 fr. 40 par unité.

Nous donnons ci-dessous l'analyse d'un échantillon de bauxite provenant du Comté de Wilkinson, en Géorgie :

Silice.....	9,38 $\frac{0}{0}$
Alumine.....	57,58
Sesquioxyde de fer.....	0,96
Acide titanique.....	2,76
Eau.....	29,47

Dosage de l'alumine dans la bauxite. — Parmi les différentes méthodes de dosage de l'alumine dans la bauxite, nous signalerons la suivante dont la précision est des plus satisfaisantes et qui présente surtout l'avantage de fournir des résultats concordant toujours entre eux jusqu'à la quatrième décimale. On opère comme suit :

Dans un creuset de nickel ouvert, on fond 1 demi-gramme de bauxite finement pulvérisée avec un excès de peroxyde de sodium et un peu de soude caustique. On remue de temps en temps le mélange pendant la fusion. Après refroidissement, on dissout la masse obtenue dans un peu d'eau, on dilue jusqu'à avoir un volume d'environ 500 centimètres cubes, on laisse déposer et on filtre en recueillant le liquide clair dans un ballon d'un litre.

Le filtre est calciné avec le produit qu'il a retenu ; sa cendre est pulvérisée soigneusement dans un creuset d'agate, puis est refondue, comme précédemment, avec du peroxyde de sodium et de la soude. Le nouveau magmat ainsi obtenu est dissous dans 200 centimètres cubes d'eau et cette solution est, sans filtration préalable, additionnée au premier filtrat. On amène à la température ordinaire le mélange des deux liquides, on complète à un litre et on prélève une partie aliquote, soit, par exemple, 100 centimètres cubes.

Ces 100 centimètres cubes sont d'abord additionnés d'un excès d'acide chlorhydrique, puis, comme à l'ordinaire, on revient à neutralité en ajoutant avec précaution de l'ammoniaque exemple

de fer. Lorsqu'on a atteint une réaction faiblement alcaline, on fait bouillir et on filtre à la trompe. On recueille ainsi un précipité d'alumine impure contenant encore de l'alcali et du chlore, on le lave une fois avec une solution de nitrate d'ammonium très faiblement alcalin, puis on le fait tomber avec un jet de pissette dans le vase où doit se faire sa précipitation définitive.

Il y est d'abord redissous dans un excès d'acide nitrique, puis on précipite l'alumine par l'ammoniaque, on fait bouillir et on filtre en se servant du même filtre que précédemment. On lave le précipité deux à trois fois avec la solution faiblement alcaline déjà employée et on le calcine humide dans un creuset en platine, comme à l'ordinaire.

Avant de pousser la calcination à fond, on humecte le précipité avec 2 centimètres cubes d'acide fluorhydrique et quinze gouttes d'acide sulfurique concentré. On chasse ces deux acides au bain de sable, puis on calcine aussi haut que possible pour obtenir une alumine anhydre et exempte de toute trace d'acide sulfurique. On termine en pesant le creuset, dont on a fait au début la tare.

La durée du dosage est de 4 à 5 heures.

En faisant avec la même prise d'essai de 1 demi-gramme quatre déterminations parallèles, on a obtenu les résultats suivants pour les quatre portions de 0^{gr},125 chacune de bauxite analysée :

Première portion	0 ^{gr} ,07060	Al ₂ O ₃
Deuxième —	0 ,07048	—
Troisième —	0 ,07040	—
Quatrième —	0 ,07050	—

Nous avons dit que cette analyse comporte une fusion alcaline dans un creuset en nickel. Les creusets en nickel que l'on trouve dans le commerce renferment souvent des proportions assez considérables d'impuretés, en particulier du soufre, du cuivre, du chrome. De plus, la plupart sont à parois trop minces et ne peuvent servir que quatre à cinq fois. Pour les laboratoires industriels qui désireraient faire usage de cette méthode d'analyse, il conviendrait de faire fabriquer spécialement des creusets en nickel pur, ayant des parois épaisses d'environ 2 millimètres, hauts de 35 millimètres et ayant 40 millimètres de diamètre. De tels creusets peuvent supporter de 20 à 30 fusions, après quoi ils

se fendillent et sont hors de service. Leur prix de revient est à peu près de 2 francs la pièce et, après emploi, ils possèdent encore une valeur marchande dont on peut tirer parti.

Alumine. — La purification de la bauxite en vue d'obtenir l'alumine pure est une opération importante et délicate, d'autant plus que l'alumine possède des propriétés chimiques assez particulières : c'est un oxyde indifférent s'unissant aussi bien aux acides pour former des sels d'aluminium qu'aux bases fortes pour donner naissance à des aluminates. Elle est insoluble dans l'eau, soit hydratée, soit anhydre. Elle fond à la température du four électrique et se transforme alors en une masse très dure, sorte de corindon artificiel, presque inattaquable par les bases et les acides usuels.

Il existe différents procédés de traitement de la bauxite par voie sèche ou par voie humide. Dans le *procédé Deville*, le minerai est attaqué au rouge par du carbonate de soude dans un four à réverbère, fixe ou tournant. Dans cette opération, de l'acide carbonique est mis en liberté, tandis que la soude se combine à l'aluminium pour former de l'aluminate de soude. Après filtration et lavage, on obtient un précipité formé des impuretés (silice, acide titanique, sesquioxyde de fer). La solution clarifiée est finalement soumise à l'action d'un courant de gaz carbonique qui en précipite de l'alumine très dense. Comme une petite quantité de silice se combine à la soude et forme du silicate de soude qui passe en solution avec l'aluminate de soude, on élimine la silice en chauffant pendant un temps suffisant la solution dans un autoclave à cinq ou six atmosphères : la silice se dépose alors peu à peu à l'état de silico-aluminate de soude. La solution, filtrée une dernière fois, donne facilement de l'alumine pure par précipitation.

Le procédé Deville, malgré les perfectionnements qu'on a cherché à lui apporter, n'est presque plus utilisé aujourd'hui, et les installations récentes d'extraction de l'alumine par son application n'ont pas conduit aux résultats espérés.

Dans le *procédé Peniakoff*, exploité actuellement par plusieurs usines, on prépare de l'aluminate de soude à partir de la bauxite et du chlorure de sodium. On réduit, soit par le charbon, soit par le sulfure de fer, un mélange de bauxite et de sulfate de soude ; la

réaction s'opère à 1.200° dans un four tournant. Dans les deux cas, il se dégage du gaz sulfureux qui, mélangé au sortir du four avec de l'air et de la vapeur d'eau, puis dirigé sur du chlorure de sodium, transforme celui-ci en sulfate de soude avec formation d'acide chlorhydrique : ce dernier est conservé à part pour être livré au commerce, tandis que le sulfate sert à purifier de nouvelles quantités de bauxite.

Le produit extrait du four est lessivé pour extraire l'aluminate de soude et la solution filtrée est traitée comme dans le procédé Deville.

Dans le *procédé Bayer*, qui est celui le plus universellement employé pour l'obtention de l'alumine pure, on a recours à la voie humide. La bauxite, grillée à 700° après concassage, est soumise à l'action d'une solution de soude (densité : 1,40 à 1,45) dans un autoclave chauffé à la vapeur et muni d'un agitateur. Au sortir de l'appareil, la solution est étendue à 1,25 de densité, clarifiée et filtrée au filtre-pressé : l'alumine peut alors en être extraite par précipitation. C'est sous l'influence d'un excès d'eau, en présence d'alumine libre, que se fait la décomposition de l'aluminate de soude. Sous une influence de masse, l'alumine libre facilite l'hydrolyse de l'aluminate, ce qui différencie nettement cette méthode des précédentes.

Le *procédé Vergé* est une variante du procédé Bayer. La bauxite, simplement concassée, est mélangée à la solution de soude caustique dans un autoclave. Le broyage et la calcination sont évités par l'emploi d'un jet de vapeur à cinq atmosphères qui pénètre dans l'autoclave et produit à la fois le chauffage nécessaire à l'attaque chimique et la désagrégation mécanique des grains de bauxite. La solubilisation de la silice serait encore plus faible que dans les méthodes précédentes. L'attaque par une lessive alcaline à haute pression n'est cependant pas exempte d'inconvénients.

Quel que soit le procédé employé, l'alumine, pour être complètement anhydre, doit être calcinée. La calcination s'effectue à 900° dans des fours de construction différente; elle entraîne toujours une dépense importante de combustible et des pertes assez grandes d'alumine. Finalement, le rendement moyen est d'une tonne d'alumine pour deux de bauxite. On perd, au cours des diverses opérations, de 4 à 6 % de l'alumine contenue dans le minerai. Aussi n'est-il pas surprenant qu'on ait cherché de divers côtés à simplifier

le mode d'obtention de l'alumine pure qui est en outre une opération longue, nécessitant beaucoup de soins et des frais élevés de main-d'œuvre. L'emploi des argiles semble devoir fournir dans un avenir plus ou moins prochain la solution économique de la question. Il en sera question plus loin (V. p. 22). Disons de suite que dans les argiles, la proportion d'alumine est de 40 à 45 % environ; les impuretés (silice et oxyde de fer) y sont en plus grande proportion que dans la bauxite en raison de la prédominance de l'alumine dans cette dernière. Le traitement des argiles en vue de la production simultanée d'un alliage et d'alumine semble intéressant, de même que le procédé de Cowles-Kayser, qui permet d'arriver à un silicate d'où l'alumine est extraite par réaction à l'aide de la chaux vive.

Hall a fixé le principe de la *fabrication directe de l'alumine à partir de la bauxite* au four électrique par voie d'affinage réducteur de cette dernière. Si l'on ajoute à la bauxite une quantité suffisante de charbon et si l'on conduit le four de façon convenable, toutes les impuretés du minéral finissent par être éliminées à l'état de ferro-alliage. On obtient de la sorte de l'alumine aussi pure que celle préparée par les méthodes chimiques précédentes et pouvant servir à la fabrication de l'aluminium. Cependant le pourcentage de charbon nécessaire à cette réduction entraîne la formation de carbure d'aluminium; aussi l'alumine électrothermique, exposée à l'humidité de l'air, se délite et tombe en poussière, par suite de la décomposition spontanée du carbure d'aluminium. Cependant, depuis la patente anglaise de Hall, d'autres brevets ont été pris; des essais industriels fort intéressants ont été faits dans divers pays et la technique du procédé peut être considérée comme établie.

Néanmoins, ce mode de purification de la bauxite n'est pas encore appliqué industriellement. Sa supériorité économique sur les procédés chimiques est en effet douteuse, d'autant plus que les alliages obtenus comme sous-produits se conservent mal. Enfin l'alumine électrothermique employée pour la préparation de l'aluminium, aurait le grave inconvénient d'encrasser le fond des cuves, soit que le grain d'alumine fondue se dissolve plus difficilement dans le bain de cryolithe que le grain d'alumine calcinée, soit que le carbure

PROCÉDÉS DE FABRICATION

d'aluminium qu'elle renferme s'accumule rapidement sur la sole.

Il faut enfin signaler le *procédé aux azotures*. — En soumettant la bauxite à l'action du four électrique (1800° à 1900°) en présence d'azote, on obtient de l'azoture d'aluminium. Celui-ci, décomposé en autoclave en présence de lessive de soude, donne d'une part de l'ammoniaque (qui peut servir aisément à la production du sulfate utilisé en agriculture) et, d'autre part, de l'aluminate de soude d'où il est facile d'extraire comme précédemment de l'alumine pure. Il y a dans l'industrialisation de l'azoture d'aluminium un point qui aura certainement une répercussion importante sur la fabrication de l'aluminium. Plusieurs usines sont du reste sur le point de s'installer ou de fonctionner d'après l'application de cette méthode. Dans le *procédé Serpek* on emploie un four électrique rotatif dans lequel un mélange de bauxite et de charbon est chauffé dans un courant d'azote. On obtient ainsi de l'azoture d'aluminium à 17-22 % d'azote ; les impuretés de la bauxite sont partiellement volatilisées, comme le silicium, ou bien passent à l'état d'alliage complexe disséminé dans la masse. Cet azoture d'aluminium impur est substitué, comme matière première, à la bauxite dans les ateliers de fabrication de l'alumine travaillant par la méthode Bayer. La valeur marchande du sulfate d'ammoniac vient ainsi en déduction importante du prix de revient de l'alumine, et comme le prix de revient de l'aluminium est en relation étroite avec celui de l'alumine, l'application de cette méthode de production de cette dernière se trouve avoir une importance capitale pour les fabricants d'aluminium.

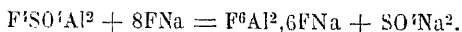
Cryolithe et fondants. — La cryolithe joue, dans la fabrication de l'aluminium, le rôle de dissolvant de l'alumine. C'est, comme nous l'avons vu, un fluorure double d'aluminium et de sodium de formule $F^6Al^2 + 6FNa$ dont le seul gisement important se trouve à Ivigtut (Groenland). Nous donnons ci-dessous l'analyse d'une cryolithe ayant cette origine :

Fluor.....	51,58 %
Alumine.....	12,81
Sodium.....	28,62
Silice.....	0,20

Elle renferme en général 80 % de cryolithe pure et 20 % de matières étrangères mélangées (sidérose, quartz, pyrites, calcite, fluorine). Comme elle doit, pour la préparation de l'aluminium, être aussi pure que possible, on la soumet avant son utilisation à un traitement minutieux consistant en des triages, broyages, tamisages et séparations électro-magnétiques. On la pulvérise ensuite finement et elle peut ainsi être employée de suite à la fabrication de l'aluminium.

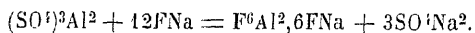
Cependant, le prix élevé de la cryolithe naturelle a suscité des recherches en vue de sa production par voie chimique et, en fait, on arrive aujourd'hui couramment à préparer de la *cryolithe synthétique* : elle ne contient pas de silice, mais renferme souvent d'autres matières étrangères et en particulier du sulfate de chaux. La majeure partie de la cryolithe utilisée dans les usines d'aluminium est ainsi obtenue : elle titre de 90 à 92 % de fluorure double. Les différents procédés qui permettent de la préparer partent tous de la fluorine, minéral très répandu et constitué par du fluorure de calcium.

Dans le *procédé Grabau*, cette fluorine est chauffée avec une solution de sulfate d'alumine. On obtient du sulfate de chaux et une solution de fluosulfate d'aluminium. D'autre part, on prépare du fluorure de sodium en décomposant la fluorine par l'acide sulfurique : celui-ci, neutralisé par du carbonate de soude, donne du fluorure de sodium. Les deux produits obtenus séparément, fluosulfate d'aluminium et fluorure de sodium, réagissant l'un sur l'autre, donnent alors la réaction :



En lavant le produit ainsi préparé, le sulfate de sodium, soluble, est éliminé et il reste de la cryolithe insoluble.

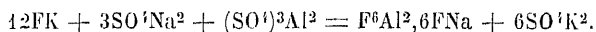
Dans le *procédé Netto*, on fond du fluorure de sodium avec du sulfate d'alumine déshydraté. On a la réaction suivante :



La cryolithe est débarrassée comme précédemment, par lessivage, du sulfate de sodium soluble.

Le *procédé Lösekann* prépare d'abord du fluorure de potassium

en chauffant la fluorine avec du sulfate de potassium et du charbon. La solution obtenue est mélangée à du sulfate de sodium et, par double décomposition, on obtient du fluorure de sodium et du sulfate de potassium. Celui-ci rentre dans la première phase de la fabrication, tandis que le fluorure de sodium, traité par du sulfate d'alumine comme dans le procédé Netto, fournit la cryolithe. D'après Lösekann, la formation de cette dernière pourrait même être réalisée directement à partir du fluorure de potassium, d'après la formule :



Le *procédé Hutin*, utilisé en France par la Société d'électrochimie, consiste à neutraliser de l'alumine hydratée pure à l'aide d'acide fluorhydrique provenant de la fluorine. On obtient ainsi de l'acide fluoaluminique, de formule $\text{F}^6\text{Al}^3,6\text{FH}$. Ce dernier, saturé par du bioxyde de sodium, donne immédiatement, d'une part de la cryolithe insoluble et, d'autre part, de l'eau oxygénée. Celle-ci, très pure, constitue un sous-produit important de la fabrication et diminue le prix de revient de la cryolithe ainsi obtenue.

La cryolithe naturelle ou artificielle fond vers 1.000° . L'addition de quantités croissantes d'alumine abaisse d'abord le point de fusion du bain et le relève ensuite, comme le montrent les chiffres ci-dessous :

Cryolithe.	Alumina.	Point de fusion.
100 $\frac{0}{0}$	0 $\frac{0}{0}$	1.000° C.
97	3	974
96	4	960
95	5	915 (minimum)
94	6	960
93	7	982
92	8	992
90	10	980
85	15	994
80	20	1.015

Il résulte de ces chiffres que, lorsque la teneur en alumine varie entre 0 et 5 $\frac{0}{0}$, le point de fusion s'abaisse graduellement de 1.000°

à 915° (*fig. 1*). Le pourcentage d'alumine continuant à croître jusqu'à 20 %, le point de fusion se relève de 915 à 1015°. Il paraît y avoir un second minimum à 10 % d'alumine (980°), mais il n'est pas très net et l'on peut avoir quelques doutes sur son existence. Il

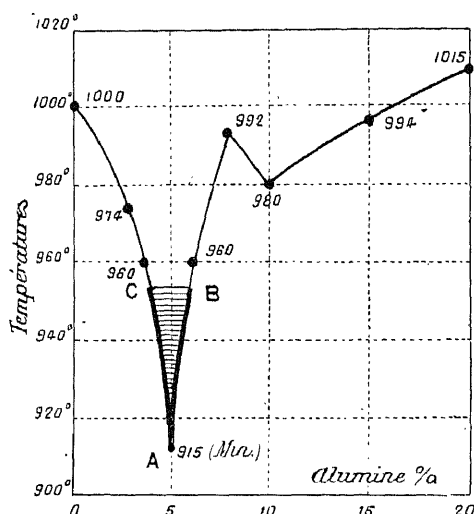


FIG. 1. — Courbe de fusibilité des mélanges de cryolithe et d'alumine.

semble qu'au-dessus de 20 % d'alumine, le bain devienne franchement pâteux aux températures usuelles de travail. Dans la pratique, on doit donc se maintenir entre 900° et 950° et, autant que possible, dans la partie hachurée ABC de la figure.

En ajoutant au mélange de cryolithe et d'alumine du fluorure de calcium ou du fluorure d'aluminium, on peut encore abaisser le point de fusion du bain et obtenir ainsi des mé-

langes notablement plus fusibles que la cryolithe. De là l'emploi des *fondants* qui permettent, par un choix judicieux, d'opérer l'électrolyse à une température relativement basse tout en conservant au bain son homogénéité physique et une fluidité suffisante. On fabrique des mélanges notablement plus fusibles que la cryolithe en additionnant cette dernière, soit de fluorure d'aluminium, soit de fluorure de calcium, soit d'une certaine proportion de ces sels mélangés. D'après Hall, le point de fusion du bain serait ainsi abaissé à 800° et ce mélange permettrait de dissoudre l'alumine en proportion plus forte que la cryolithe seule. Les chlorures alcalins feraient descendre le point de fusion à un chiffre encore plus bas, soit 700°, mais ils présentent l'inconvénient de donner des bains de composition instable à cause de la volatilisation rapide de ces sels. Quoi qu'il en soit, dans les usines appliquant le procédé Hall, qui est

sensiblement le même que celui d'Hérault, on utilise le mélange suivant :

Cryolithe.....	36 0/0
Fluorure de calcium.....	20
Fluorure d'aluminium.....	44

En France, il semble qu'on ait renoncé, au moins dans ces dix dernières années, à un pourcentage aussi élevé de fluorure d'aluminium.

Le fluorure de calcium est toujours employé à l'état de composé naturel, c'est-à-dire de fluorine. Le fluorure d'aluminium s'obtient de différentes manières, notamment en chauffant à siccité un mélange de sulfate d'aluminium et de cryolithe (procédé Grabau). Mais la méthode la plus couramment employée consiste à faire agir, à la température ordinaire, de l'acide fluorhydrique en solution, soit sur de la bauxite, soit sur de l'alumine hydratée. D'après M. Flusin, il n'est cependant pas facile de préparer cette substance parfaitement pure, car le produit industriel renferme toujours de 1,5 à 3 0/0 de silice et même, assez fréquemment, de 0,5 à 0,9 0/0 de soufre.

Électrodes. — Elles jouent un rôle très important dans la fabrication de l'aluminium, car c'est plus de leur pureté que de celle de l'alumine et de la cryolithe que dépend la qualité du métal obtenu. Aussi doit-on utiliser pour leur préparation un charbon aussi pur que possible, possédant très peu de cendres et exempt autant qu'il se peut de fer et de silicium. La matière première servant à leur préparation peut être du coke de pétrole ou de goudron, ou encore de l'anthracite. C'est le coke de pétrole qui domine sur le marché; il ne contient généralement que 0,5 à 2 0/0 de cendres, mais parfois jusqu'à 1,25 0/0 de soufre; les matières volatiles représentent 12 à 15 0/0; on cherche à les expulser le plus possible avant emploi et, à cet effet, on fait subir au coke une nouvelle cuisson dans des cornues verticales en terre réfractaire. Le coke des cornues à gaz est rarement employé, car il est ordinairement trop riche en silice à cause des fragments de pâte réfractaire qui y restent adhérents.

Pour la fabrication des électrodes, le coke est d'abord concassé et broyé, puis mélangé avec du goudron chauffé. La pâte obtenue est comprimée, puis étirée en prismes au moyen d'une puissante presse horizontale. Ces prismes sont divisés en sections de longueur convenable, puis cuits au rouge vif. On obtient ainsi des électrodes assez denses, homogènes et suffisamment conductrices de l'électricité. Nous donnons ci-dessous l'analyse moyenne d'un lot d'électrodes ainsi obtenues :

Carbone fixe.....	97,20 %
Cendres { Silice.....	0,55
{ Sesquioxyde de fer.....	0,44
{ Divers	0,41
Humidité.....	0,35
Matières volatiles { Hydrogène.....	0,23
{ Autres gaz.....	0,42
Soufre	0,40

La forme et les dimensions des électrodes varient suivant les usines. Tantôt on leur conserve la section carrée de 0^m,25 de côté, tantôt on leur préfère la section rectangulaire, généralement 0^m,10 sur 0^m,08 afin de diminuer leur poids. Pour combattre l'usure due à la combustion (environ 0^{kg},7 à 1 kilogramme d'anodes brûlées par kilogramme d'aluminium), certaines usines donnent aux électrodes la forme d'un cube ou d'un tronc de pyramide dont la petite base plonge dans le bain; l'électrode est ainsi immergée presque entièrement et l'usure de la partie émergente est évitée; la section est alors de 25 à 30 centimètres de côté, la longueur de 30 à 50 centimètres; ces dimensions correspondent à un poids de 35 à 70 kilogrammes par électrode.

Il est très important, pour éviter des pertes, d'établir une connexion parfaite entre les électrodes et les conducteurs qui les relient à la canalisation électrique. D'autre part, il faut que les pièces métalliques constituant cette connexion n'aient pas à souffrir du voisinage du bain. La connexion axiale est celle qui paraît le mieux convenir. Dans ce but, on fore après fabrication, sur l'axe des électrodes et à l'une des extrémités de celle-ci, un trou dans lequel on insère la partie terminale du câble. Pour assurer la solidité du joint, certaines usines procèdent par filetage en pas de vis ;

dans d'autres, après avoir fileté la partie supérieure du trou foré dans la pâte, on introduit dans celui-ci une tige ou une lame de cuivre qu'on fixe en coulant du bronze dans l'intervalle. Le scellement se fait avant ou après la cuisson de l'électrode suivant les cas. Le joint est généralement très solide, ce qui permet d'utiliser le charbon presque jusqu'à son extrémité supérieure, c'est-à-dire jusqu'à usure complète. Cette considération est importante, le prix moyen des électrodes variant entre 350 et 380 francs la tonne.

Lorsqu'on est dans l'impossibilité d'utiliser les électrodes entièrement, on fait rentrer les déchets en fabrication. On a cependant cherché, dans ces derniers temps, divers procédés permettant de reconstituer des électrodes neuves à l'aide des fragments ayant des dimensions suffisantes. La méthode qui paraît la plus digne d'intérêt est celle qui procède par sciage et filetage des morceaux et réunion de ceux-ci par d'autres fragments de charbon graphitique préparés d'avance pour ce filetage.

II. — Fabrication.

Fours. — Il existe plusieurs modèles de fours, ou *cuves*, ou *marmiles*, destinés à la fabrication de l'aluminium. Certains (*fig. 2*) sont dépourvus de fond métallique et sont posés sur un massif en maçonnerie réfractaire *s*. Le trou de coulée est généralement percé sur un des longs côtés, le four affectant une forme rectangulaire. Le garnissage intérieur *f* est constitué parfois uniquement par un pisé de carbone ; mais souvent on réduit la dépense de celui-ci en appliquant contre les parois *p* en tôle un premier revête-

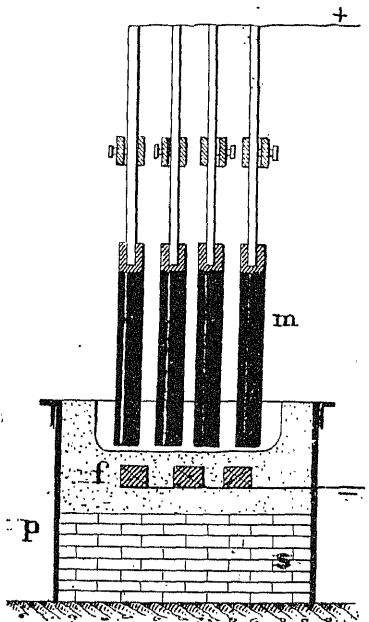


FIG. 2. — Four à aluminium sans fond métallique.

ment en briques réfractaires. Le fond du creuset est presque toujours formé d'une couche épaisse de pisé de carbone. Dans l'ensemble du garnissage ou de la couche de fond sont noyés plusieurs fers plats, de section suffisante et reliés à l'électrode négative de la source d'énergie électrique. Le pisé est semi-conducteur de l'électricité ; mais la présence des fers a pour effet d'augmenter beaucoup la conductibilité. Les anodes *m* sont formées par des prismes de charbon aggloméré, comme il a été dit plus haut ; elles montent et descendent simultanément ou individuellement, soit à la main, soit à l'aide d'engrenages fonctionnant mécaniquement. En raison de leurs poids, elles doivent être soutenues par un mode de suspension très robuste.

L'inconvénient de ce dispositif est d'entraîner un fort dégagement de vapeurs de goudron au moment de la mise en train de chaque cuve neuve ; ces vapeurs sont dues au fait que le pisé de carbone doit subir la cuisson sur place en raison de son volume.

En outre, ce pisé n'acquiert jamais une conductibilité suffisante, comparable, par exemple, à celle des électrodes de carbone étirées sous pression et cuites à haute température.

Aussi a-t-on recours, dans beaucoup d'usines, à la disposition représentée par la figure 3. Le four comporte un fond percé et, à travers l'ouverture ainsi ménagée, on fait passer un faisceau composé de 8 à 10 électrodes prismatiques *a* ; ces dernières, qui ont environ 30 centimètres de côté, sont serrées les unes contre les

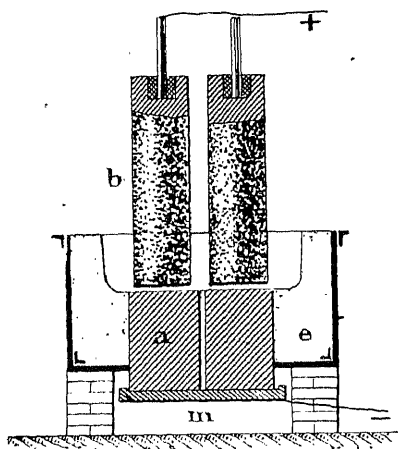


FIG. 3. — Four à aluminium à cathode-sole.

autres et reposent sur une plaque épaisse en fer *m* reliée au pôle négatif de la source de courant. L'extrémité supérieure du faisceau est approximativement au niveau de la base du creuset et, tout autour, on dame fortement et régulièrement avec du pisé de car-

bonne *e*. On assure ainsi l'étanchéité des joints et, en même temps, la résistance du circuit est diminuée. A chaque électrode de fond *a* correspond généralement une anode *b* de section un peu moindre. Le dégagement des vapeurs de goudron est ainsi de beaucoup diminué.

Bien entendu, le fond du creuset présente une pente régulière quoique douce vers le trou de coulée. Pendant l'opération, celui-ci est bouché avec du pisé de carbone. La coulée s'effectue ainsi très facilement.

Les électrodes mobiles, ou anodes, sont plus ou moins nombreuses suivant leur section. Quand celle-ci est faible (8 à 10 centimètres de côté), on les dispose par quatre rangées de huit ou neuf électrodes chacune, ce qui fait au total 32 ou 36 électrodes pour une surface totale de 0^m2,256 ou 0^m2,288. Avec les charbons de 23 centimètres de côté, on fait généralement deux rangées de cinq électrodes, correspondant à une surface totale de 0^m2,625.

Conduite de l'opération. — La principale condition que doit remplir le bain électrolytique est d'être moins dense que le métal pour permettre à celui-ci de se rassembler au fond de la cuve au fur et à mesure de sa production. De plus, il doit être constamment protégé contre l'oxydation par une nappe suffisamment épaisse de sels fondus, bien que l'oxydabilité de l'aluminium fondu à l'air soit pratiquement négligeable. La densité joue donc un rôle important dans cette opération. Or, on sait que la cryolithe solide a une densité de 2,92; à l'état liquide, celle-ci n'est plus que de 2,08. Celle de l'aluminium à l'état solide est de 2,66 et, à l'état fondu, de 2,54. Ainsi, l'aluminium solide, quoique moins dense que la cryolithe solide, ira cependant se réunir au fond de la cuve quand le bain sera constitué, comme c'est en pratique, par de la cryolithe fondue. La différence de densité des deux substances est en effet dans cet état de 0,46. L'addition d'alumine et de fondants n'augmente pas la densité du bain et la différence entre cette dernière et celle du métal fondu est généralement suffisante pour qu'on puisse extraire ce dernier régulièrement par coulée. Les phénomènes d'inversion des densités, dues à un mélange défectueux des composants du bain, sont en effet très rares. On cherche à les éviter à tout prix,

car ils nécessitent la mise hors de service momentanée de la cuve.

Une opération complète comprend l'alimentation en matières premières, le réglage, le changement des électrodes, s'il y a lieu, et la coulée.

Pour faire la mise en marche des fours, on met en court-circuit les électrodes supérieures et le fond de la cuve par l'intermédiaire d'une résistance ; celle-ci est généralement constituée par de petits blocs de charbon. Puis, peu à peu, on introduit dans la cuve de la cryolithe pure ou additionnée de fondants. Quand ces matières sont passées à l'état liquide, on laisse le courant atteindre progressivement son intensité normale, et on l'alimente en cryolithe et fondants. Après avoir remonté lentement les anodes, et quand le volume du bain est suffisant, on charge en alumine et on agite fréquemment pour favoriser sa dissolution.

Le bain devant être protégé continuellement contre l'action oxydante et refroidissante de l'air, on le recouvre d'une couche d'alumine en poudre qui fond au contact des anodes. Comme le bain s'appauvrit de plus en plus en alumine au fur et à mesure que l'électrolyse se poursuit et que le métal se dépose, on compense les pertes d'alumine. Un dispositif très ingénieux permet d'effectuer les additions d'oxyde au moment opportun ; il consiste en une lampe ou une série de lampes à incandescence montées en dérivation aux bornes des fours ; la résistance des filaments est calculée de façon que la lampe s'éclaire dès que le pourcentage d'alumine est insuffisant. L'addition du mélange de cryolithe et de fondants ne se fait qu'à intervalles de plusieurs jours.

Le mauvais réglage d'un four se voit du reste assez aisément : si l'allure est trop chaude, la flamme qui entoure les anodes se développe et se colore en jaune, et le remède est d'abaisser les anodes.

L'aluminium s'accumule progressivement au fond de la cuve. Les coulées se font tous les deux ou trois jours environ suivant les dimensions des fours. On les effectue, non pas directement, mais dans une poche qui retient à l'état solide les fluorures entraînés.

Installations. — Les fours sont installés dans des salles de grandes dimensions et généralement en rangées parallèles. Mais on

adopte aussi, dans certaines usines, la disposition en crémaillère, c'est-à-dire par lignes un peu obliques par rapport à la section transversale du bâtiment; les fours se touchent successivement par un angle. Cette disposition, économique au point de vue de l'installation, est incommode pour le travail et favorise l'accumulation de la chaleur dans la salle; aussi la tendance actuelle est-elle dans l'adoption de salles ne comportant qu'une ligne de fours.

Rendement. — En fonctionnement normal, le rendement pratique ou économique se rapproche sensiblement du rendement théorique et varie entre 90 et 95 %. Cependant la production moyenne annuelle n'atteint pas ce pourcentage et cela se comprend : le rendement est en effet fonction du nombre de fours fonctionnant simultanément, de la puissance de chaque four, des accidents de marche, etc. D'après M. Flusin, la production moyenne d'aluminium oscille entre 210 et 275 kilogrammes de métal par kilowatt-an, soit entre 154 et 202 kilogrammes par cheval-an. Ce rendement correspond à une dépense d'énergie comprise entre 31 et 41 kilowatts-heure par kilogramme d'aluminium et à un rendement industriel compris entre 58 et 76 %.

Quant à la consommation des matières premières, elle est facile à calculer par kilogramme de métal obtenu. Il faut compter sur une dépense de 2 kilogrammes au moins d'alumine et une consommation de 700 grammes à 1 kilogramme de déchets et d'usure des anodes. La consommation de cryolithe et de fondants est très faible, soit 120 à 200 grammes pour la cryolithe et 200 grammes environ pour les fluorures de calcium et d'aluminium.

Les pertes de ces produits proviennent des électrolyses secondaires, de la volatilisation, des traitements mécaniques (broyage, etc.). La bonne conduite des cuves les réduit dans une assez forte proportion.

Réduction directe de l'alumine par le charbon. — La réalisation pratique de la réduction électrothermique de l'alumine a toujours été considérée comme très difficile. En effet, si l'on essaie de réduire l'alumine seule, on risque de volatiliser une partie de l'aluminium et de le transformer en alumine au contact des parties

les moins chaudes de l'appareil, et l'aluminium non volatilisé peut se transformer en carbure. Cela explique pourquoi les essais tentés dans ce sens n'ont pu entrer dans le domaine industriel.

Lorsqu'on cherche à réduire l'alumine par le charbon, la réaction se passe comme si l'on obtenait, non pas de l'aluminium, mais du *carbure* de ce métal; c'est un phénomène analogue à celui de la réduction de la chaux par le charbon : on obtient, non point du calcium, mais du carbure de calcium. Si on laisse le bain se refroidir lentement lors de sa formation, ou si on le maintient à 700 ou 800°, c'est-à-dire à une température légèrement supérieure à celle du point de fusion de l'aluminium, on voit de l'aluminium métallique sourdre du carbure et l'on peut recueillir ainsi un poids de métal égal à la moitié de l'aluminium total contenu dans le produit; celui-ci prend une coloration de plus en plus foncée à mesure que le métal s'écoule.

D'où vient l'aluminium ainsi libéré? Il a une double origine et il provient :

a) De la réduction directe de l'alumine par le charbon, de sorte que le produit sortant du four est un mélange, en proportions variables, d'aluminium et de carbure d'aluminium, ou plutôt une solution du métal dans le carbure d'aluminium;

b) De la dissociation du carbure d'aluminium, qu'une élévation de température suffisante décompose en ses éléments : l'aluminium distille vers les régions froides du four ou se dissout dans le carbure subsistant, tandis que le carbone reste à l'état de graphite.

On peut, en somme, conclure avec Askenasy que, pour obtenir par réduction électrothermique directe de l'alumine par le charbon de grandes quantités d'aluminium, il faudra : ou bien ne pas dépasser sensiblement la température d'ébullition du métal (1.800°), ou bien employer un dispositif de condensation des vapeurs métalliques.

De nouvelles recherches et de nombreux essais sont cependant encore nécessaires avant que l'on puisse espérer réussir à fixer les bases d'un procédé industriel ayant un rendement satisfaisant.

Il en est autrement de la réduction de l'alumine par le carbone en présence du fer et du cuivre. A la température du four électrique, cette réduction s'effectue aisément et convenablement : non seule-

ment ces métaux, assez fixes pour ne pas se volatiliser à la température nécessaire à la réduction, absorbent les vapeurs d'aluminium, mais aussi empêchent ce métal de passer à l'état de carbure. On obtient donc, non pas de l'aluminium pur, mais un alliage d'aluminium : ferro ou cupro-aluminium. C'est sur ce principe qu'est basé le procédé Cowles.

On a aussi cherché à substituer au carbone un mélange de chaux et de charbon (procédé Tucker et Moody), mais la réaction donne surtout naissance à du carbure d'aluminium si l'opération n'est pas surveillée de près. D'après les inventeurs, il se formerait d'abord du carbure de calcium par réaction entre la chaux et le charbon à la température de l'arc électrique. Ce carbure, grâce à son caractère de combinaison exothermique, produirait une quantité de chaleur facilitant la réduction de l'alumine. La durée de l'opération a une grande importance sur les résultats obtenus ; elle doit être relativement courte pour éviter la production de carbure d'aluminium. Le meilleur résultat paraît être obtenu en mélangeant 150 parties d'alumine, 200 de carbonate de calcium et 60 de coke.

Emploi du sulfure d'aluminium. — Le procédé Leccesne, qui aurait été étudié et essayé industriellement, repose sur l'action de l'aluminium sur le sulfure d'aluminium anhydre. D'après l'inventeur, chaque fois qu'un mélange intime d'alumine et de charbon est mis en présence du soufre, il se forme du sulfure d'aluminium en même temps qu'il se dégage de l'oxyde de carbone. Ce sulfure d'aluminium anhydre, plus ou moins pur, mis en contact, à l'abri de l'air, avec de l'aluminium porté à haute température, se décompose en aluminium métallique et en soufre récupérable en nature.

Ces deux opérations, combinées en une seule, permettent d'obtenir industriellement de l'aluminium. On procède comme suit :

La *bauxite*, finement broyée avec un *charbon* aussi exempt que possible de cendres, est mise en masse verticale, un peu tassée, sur de l'*aluminium* qu'on chauffe fortement. Quand la *bauxite* et le *charbon* ont atteint une température suffisante, on introduit du *soufre* dans l'appareil, en un point qui se trouve sensiblement au niveau du contact de la *bauxite* et de l'*aluminium*.

Par suite de réactions inverses, il se forme immédiatement du

sulfure d'aluminium et de l'aluminium métallique qu'on fait écouler de l'appareil par l'ouverture qui sert à l'introduction du soufre.

La même masse de soufre peut servir, grâce à ces réactions inverses, à transformer constamment les charges successives de bauxite et de charbon en aluminium. L'opération n'est limitée que par l'encrassement résiduel dû au fer et au sulfure de fer qui se précipitent et aux impuretés qui surnagent à la surface du métal fondu. Le fer contenu dans la bauxite occasionne une légère perte de soufre, mais ne constitue pas un obstacle à la marche régulière de l'opération, pas plus du reste que la silice renfermée dans ce minéral.

Les procédés utilisant la réduction électrothermique et électrolytique du sulfure d'aluminium (Gooch, Peniakoff, Gin), de même que ceux basés sur l'électrolyse des sels haloïdes de l'aluminium, n'ont pas donné de résultats applicables à l'industrie.

Emploi des silicates d'alumine (argiles). — L'utilisation des argiles pour la fabrication de l'aluminium présente une grande importance industrielle et économique car, résolue pratiquement, elle permettrait de vulgariser encore davantage les emplois de ce métal en abaissant considérablement les prix actuels. Plusieurs solutions ont été proposées et mises à l'essai :

Dans le *procédé Cowles-Kayser*, on part de l'argile ordinaire Al^2O^3 , 2SiO^2 que l'on pétrit avec du charbon et du sel marin. Le mélange est porté à 1.000° environ et soumis à l'action de la vapeur d'eau. Celle-ci, décomposée par le charbon à haute température, donne : de l'hydrogène qui se porte sur le chlore du sel marin pour former de l'acide chlorhydrique; de l'oxygène qui se porte sur le sodium pour former de la soude; de l'oxyde de carbone qui peut être employé comme agent de chauffage ou de force motrice; enfin un silicate d'alumine complexe correspondant approximativement à la formule $(\text{SiO}^2)^2, \text{Al}^2\text{O}^3, (\text{Na}^2\text{O})^2$.

C'est ce silicate qu'on utilise pour l'extraction de l'alumine. Pour cela, on le traite par la chaux vive : on obtient du silicate bicalcique, de la soude et de l'alumine qui peut servir directement à la préparation de l'aluminium métallique.

Quant au silicate bicalcique, chauffé dans un four à ciment avec une proportion convenable de chaux, il fournit un excellent ciment hydraulique, exempt de toute trace de fer, celui-ci ayant été complètement éliminé par les opérations précédentes.

Dans le *procédé Moldentrauer*, qui permettrait d'abaisser le prix de l'aluminium à 0 fr. 50 le kilogramme, on s'est basé sur cette remarque d'expérience qu'en essayant de décomposer le carbure double d'aluminium et de silicium par l'oxyde de fer, on observe la volatilisation d'une partie de l'alumine. Pour obtenir cette dernière, on peut donc opérer en distillant au four électrique un mélange de silicate d'alumine, d'oxyde de fer et de charbon.

Dans ce but, on fait un mélange d'argile, d'hématite et de coke qu'on soumet, après broyage, à l'action d'un courant d'intensité élevée. On obtient un mélange de ferrosilicium, un résidu liquéfié et des produits de condensation que l'on entraîne hors du four par un tube coudé. Ces derniers ont pour composition centésimale :

SiO_2	24,3 %
Fe.....	2,1
Al_2O_3	72,4

Le ferro-silicium a une teneur en silicium de 19,75 %/0. Le résidu contient des fragments de ferro-silicium. Le reste a la composition suivante :

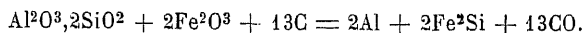
Silice.....	2,52 %/0
Oxyde de fer	0,25
Chaux.....	Traces
Alumine	97,12

Cette dernière est de l'alumine fondue. On obtient donc directement, à partir de l'argile, du ferro-silicium sous une couverte d'alumine. Le procédé a été rendu plus pratique en diminuant le pourcentage des sous-produits formés et surtout la quantité d'énergie dépensée pour la réduction de Fe_2O_3 qu'on peut utiliser à meilleur compte. En changeant la proportion d'oxyde de fer et en introduisant une partie du fer sous forme de ferro-silicium, on arrive à produire un mélange contenant presque exclusivement du ferro-silicium et de l'alumine. Cette dernière, broyée et purifiée par

l'aimant des globules de ferro-silicium qu'elle peut contenir, est de l'alumine à peu près pure. Elle permet d'obtenir environ 70 % de la proportion d'alumine qu'indique la théorie.

La question de l'utilisation de l'argile pour la fabrication de l'alumine et de l'aluminium est donc, en principe, résolue. Un premier four électrique donne un ferro-silicium à forte teneur en silicium et une alumine impure qui, refondue dans un second four électrique, est prête à subir l'électrolyse pour l'obtention de l'aluminium.

L'ensemble de la réaction peut être représenté par l'équation suivante :



L'argile étant l'un des produits les plus répandus dans la nature, il y a lieu de penser que l'extraction de l'aluminium par son emploi permettra la solution pratique et économique d'un problème métallurgique et industriel fort important. Les débouchés de l'aluminium ne pourront qu'en bénéficier, étant données les nombreuses applications dont ce métal est susceptible.

III. — Production et consommation.

Principaux pays producteurs. — Jusqu'en 1896, la Suisse est restée à la tête des pays producteurs d'aluminium; depuis, elle s'est laissé progressivement distancer et, actuellement, on peut classer comme suit les divers pays qui s'occupent de cette industrie au point de vue fabrication :

	Production annuelle.
États-Unis et Canada.....	28.500 tonnes
France.....	18.000 —
Suisse.....	12.000 —
Allemagne et Autriche-Hongrie.....	10.000 —
Angleterre.....	7.000 —
Norvège.....	1.500 —
Italie.....	1.000 —

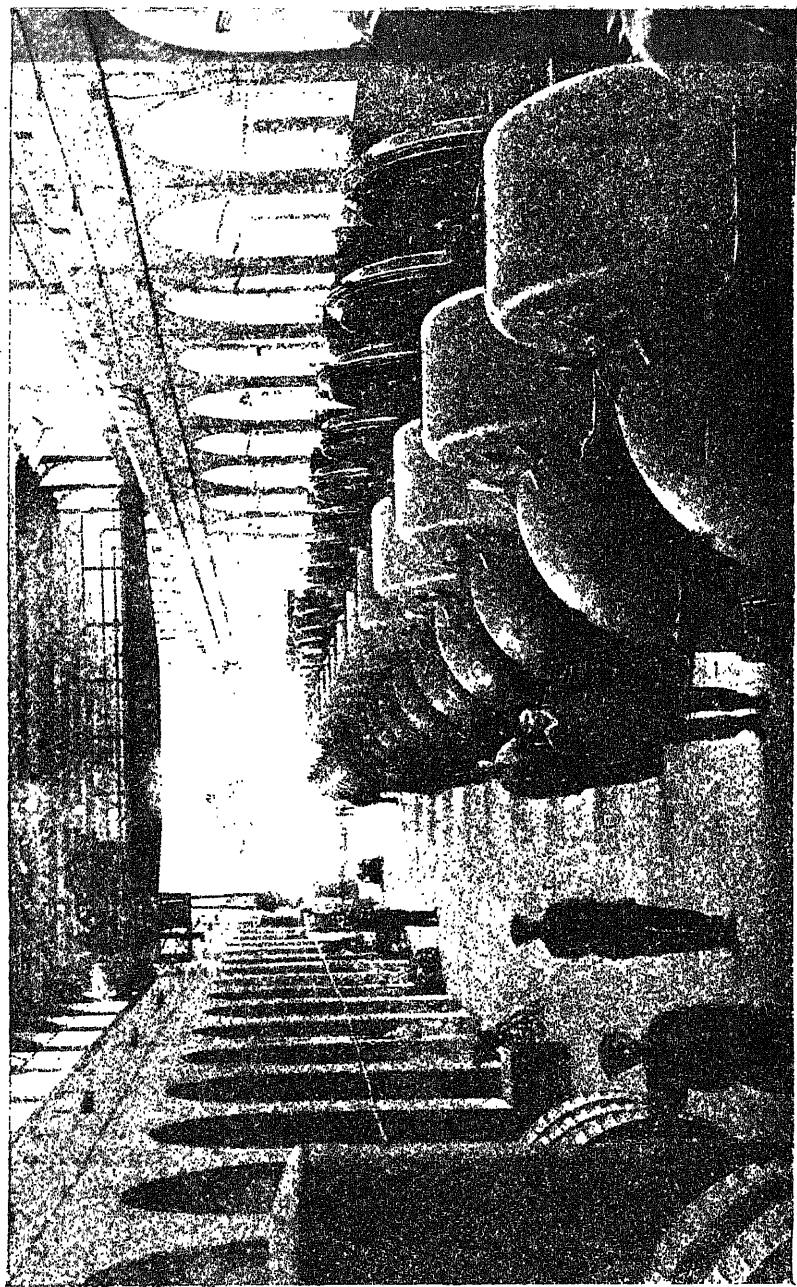


FIG. 4. — Salle des turbo-dynamos de l'usine à aluminium de Saint-Michel-de-Maurienne (Savoie)
appartenant à la Société électrométallurgique française.



La France est donc en excellente posture (*fig. 5*). Sa situation est encore meilleure si on l'étudie comparativement aux autres pays pour les importations et les exportations. Elle est de beaucoup le

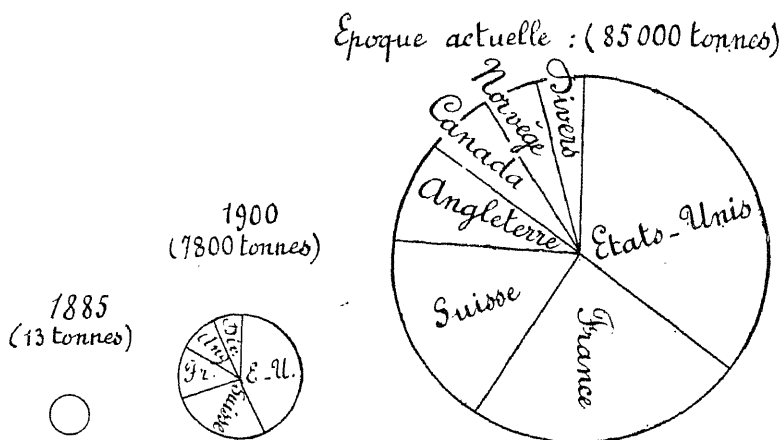


FIG. 5. — Graphiques montrant la production comparée des divers pays en aluminium.

pays qui exporte le plus d'aluminium et c'est elle qui, en fait, se trouve à la tête du marché européen.

Usines françaises. — La France possède les plus riches gisements de bauxite du monde entier. La production de notre pays est de 18.000 tonnes annuellement, alors que celle du monde entier ne dépasse pas 70.000 tonnes.

Depuis l'expiration des brevets Héroult, en 1907, les usines de fabrication de l'aluminium se sont multipliées et, actuellement, on peut, en France, les répartir ainsi qu'il suit, comme capacité de production :

Société électrométallurgique française :

	Tonnes d'aluminium
Usines de Largentière (Hautes-Alpes).....	9.000
Usines de La Praz (Savoie)	
Usines de La Saussaz (Savoie).....	
Usines de Saint-Michel (Savoie) (v. <i>fig. 4</i>).....	

Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Calipso (Savoie)	7.000
Usine de Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie).....	
Usine de Saint-Félix-de-Maurienne (Savoie).....	
Usine de Pontamafrey (Savoie).....	

Société d'électrochimie :

Usine de Prémont (Savoie).....	1.000
--------------------------------	-------

Société des produits électrochimiques des Pyrénées :

Usine d'Auzat (Ariège).....	3.000
-----------------------------	-------

Comme on le voit, les principales usines se trouvent concentrées en Savoie, dans la vallée de la Maurienne. Depuis Modane jusqu'à Saint-Jean-de-Maurienne, on en compte six représentant près de 80.000 chevaux.

Usines étrangères. — En dehors de la France, on trouve comme principales Sociétés d'aluminium les suivantes :

Aluminium Industrie Gesellschaft :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Neuhausen (Suisse).....	1.000
Usine de Chippis (Suisse).....	1.000
Usine de Rheinfelden (Allemagne).....	600
Usine de Lend-Gastein (Autriche).....	1.200

British Aluminium Co :

Usine de Foyers (Écosse).....	800
Usine de Stangfjord (Norvège).....	1.000

Aluminium Corporation :

Usine de Dolgarrog (Pays de Galles).....	1.800
--	-------

Anglo-Norwegian Aluminium Co :

Usine de Vigeland (Norvège).....	500
----------------------------------	-----

Società italiana per la fabbricazione dell'Allumininio :

	Tonnes d'aluminium.
Usine de Bussi-Pescara.....	1.200

Société italienne d'Aluminium :

Usine de Popoli.....	1.000
----------------------	-------

*The Aluminium Company of America et Northern
aluminium Cy of Canada :*

Usine de Niagara Falls.....	30.000
Usine de Masséna.....	
Usine de Québec.....	
Usine de Shawinigan-Falls.....	

Production mondiale. — En totalisant la puissance et la capacité de production de toutes les usines du monde fonctionnant régulièrement, on constate que plus de 330.000 chevaux sont actuellement consacrés à la seule fabrication de l'aluminium ; la capacité de production annuelle est voisine de 75.000 tonnes d'aluminium.

Jusqu'en 1906, la consommation et la production sont restées à peu près équivalentes, mais en 1907, par suite de la chute des brevets Héroult dans le domaine public et de la création de nouvelles usines, il y a eu surproduction. En 1908, il en a été de même. En 1909 et 1910, le phénomène inverse s'est produit et les demandes ont surpassé la production. Il s'est finalement manifesté une sorte d'équilibre dans la production et la consommation.

Situation des usines. — A la fin de l'année 1910, les sociétés françaises productrices d'aluminium ont fait une entente qui a abouti à la création d'un Syndicat français de l'aluminium pour une durée de 10 ans. Il y a lieu de s'en féliciter car la France ne consomme guère que le tiers de ce qu'elle peut produire et elle doit ainsi nécessairement chercher dans l'exportation un écoulement de son excès de production. L'exportation croît du reste progressivement : alors qu'elle n'était que de 660 tonnes en 1904, elle

devint de 1.500 tonnes en 1906 et de 4.400 tonnes en 1909. Elle atteint aujourd'hui des chiffres beaucoup plus élevés encore. L'aluminium français lutte donc avec succès contre l'aluminium étranger et cela est d'autant plus intéressant que notre pays est en mesure de satisfaire des demandes importantes. Ajoutons que pour utiliser l'excès de puissance dont elles disposent, beaucoup d'usines se livrent à d'autres fabrications telles que : ferro-alliages, carbure de calcium, carborundum, émeri artificiel, alliages spéciaux, etc.

La puissance aménagée dans le monde entier en vue de la fabrication de l'aluminium est de 550.000 chevaux environ ; elle représente une puissance effective moindre, évaluée à 450.000 chevaux moyens. Au rendement de 200 kilogrammes par cheval-an, les usines pourraient fournir ensemble environ 75.000 tonnes de ce métal, chiffre indiqué plus haut.

Prix. — Le prix du kilogramme d'aluminium a subi quelques variations dans ces dernières années, et les variations des prix de vente ont suivi dans une certaine mesure celles du prix de revient : elles ont subi en outre l'influence des modifications d'équilibre entre la production et la consommation. En 1855, le kilogramme d'aluminium valait 1.250 francs : c'était encore, lors de la découverte de Deville, presque un métal précieux. Dans la période 1855-1866, il tomba à 125 francs. En 1886, il descendit à 78 francs. Lors de l'apparition des procédés électrochimiques, une nouvelle baisse, encore plus sensible, se manifesta et, en 1890, le métal tomba à 19 francs. Nous le voyons diminuer ensuite graduellement : à 7 fr. 50 en 1892, à 3 fr. 10 en 1897, à 2 fr. 50 en 1900. En 1905, on constate un relèvement des prix dû à la difficulté de production par suite des conditions climatiques et des grèves (4 fr. 50 en 1905, 4 fr. 35 en 1907). Depuis 1908, en raison de l'expiration des brevets Héroult et de l'accroissement des moyens de production, le métal est retombé au-dessous de 2 francs. Le cours varie entre 1 fr. 70 et 2 fr. 50 depuis une dizaine d'années. Cependant, au cours de ces dernières années, on a noté des hausses importantes dues au fait de la guerre. Voici en effet les chiffres du prix du kilogramme, à partir de 1910 :

Années.	Prix du kilogramme.
1910.....	1 fr. 60 à 2 fr.
1911.....	1 fr. 30 à 1 fr. 70
1912.....	1 fr. 70 à 2 fr. 15
1913 (janvier).....	2 fr. 90
1914.....	2 fr. à 2 fr. 40
1915 (décembre).....	6 fr. 30
1916 —	6 fr. 80 à 7 fr.

Ces prix concernent l'aluminium commercial pur à 98-99 $\frac{0}{100}$.

Le développement considérable des applications de l'aluminium, notamment dans la construction des lignes électriques, a placé ce métal au sixième rang parmi les métaux usuels. C'est un succès remarquable, étant donné qu'il peut ainsi, par son faible prix de revient, concurrencer le cuivre dans l'une de ses applications les plus importantes. La fabrication des alliages le substitue en outre partiellement au zinc, au magnésium, à l'étain, etc., et tend ainsi à généraliser et à étendre de plus en plus ses emplois.

CHAPITRE II

PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM

I. — Propriétés physiques et mécaniques.

Densité. — Elle varie suivant la pureté du métal, son mode de préparation, sa cohésion, les traitements mécaniques ou métallurgiques. Elle est généralement comprise entre 2,56 et 2,75. L'aluminium est donc le plus léger des métaux usuels; si on le compare à ce titre au cuivre ($d = 8,8$), au zinc ($d = 6,9$), à l'étain ($d = 7,3$), on voit qu'il est environ 3,3 fois plus léger que le cuivre, 2,5 fois plus que le zinc et 2,7 fois plus que l'étain. C'est là une de ses propriétés importantes au point de vue de ses emplois.

Les recherches de Kohn-Abrest sur un échantillon à 99,3 % d'aluminium provenant des usines de Froges ont conduit au chiffre de 2,7573 comme densité moyenne à 0°. A 15°, on trouve 2,6697 et, à 20°, 2,6570. Ces déterminations ont été faites par la méthode du flacon avec les précautions nécessaires. L'aluminium laminé ou tréfilé a pour densité 2,7.

Poids atomique. — Il se rapproche sensiblement de 27. La Commission des poids atomiques a adopté le chiffre 26,9 en prenant $H = 1$ et $O = 15,88$. Kohn-Abrest indique 27,09. Ces résultats ne sont pas très concordants, ce qui tient surtout au peu d'homogénéité des échantillons d'aluminium industriel. En préparant à l'état du pureté du sulfate d'alumine neutre, Baubigny a trouvé 26,992.

Conductibilité calorifique. Chaleur spécifique. — D'après Lorenz, la *conductibilité calorifique* de l'aluminium est égale à 36; seules les conductibilités de l'argent (100) et du cuivre (75) sont plus élevées. Et, ainsi que le laisse prévoir la loi de Dulong et Petit, la *chaleur spécifique* de ce métal, soit 0,22, est de beaucoup supérieure à celle des métaux usuels tels que le fer (0,11) et le cuivre (0,09). Son *pouvoir émissif* est relativement faible. Ces trois qualités, jointes à la légèreté de l'aluminium, rendent ce métal éminemment propre à la fabrication des ustensiles de cuisine et de ménage.

Couleur. — L'aluminium est blanc bleuâtre, blanc d'argent ou blanc grisâtre suivant les échantillons. Ces différences dépendent de la nature et de la quantité d'impuretés contenues dans le métal (silicium, fer, carbone) et qui modifient sa structure moléculaire.

Sonorité. — La sonorité de l'aluminium, propriété assez peu connue, est telle qu'un lingot de ce métal suspendu à un fil émet un son de cristal lorsqu'on le frappe. Cette propriété est susceptible de nombreuses applications concurremment aux bronzes.

Conductibilité électrique. Résistivité. — La conductibilité électrique de l'aluminium est une de ses principales qualités; on l'applique surtout dans l'industrie électrique pour la fabrication et l'emploi de ce métal comme conducteur de courant (v. p. 88). A cet égard, l'aluminium se place immédiatement après l'argent, le cuivre et l'or. Sa conductibilité électrique est de 59 à 60 % celle du cuivre. Pour les calculs, on estime respectivement à 18 et 30 ohms les résistances électriques d'un fil de cuivre et d'un fil d'aluminium de 1 kilomètre de longueur et de 1 millimètre carré de section.

La *résistivité* de l'aluminium, qu'expriment du reste ces derniers chiffres, varie avec la teneur et la nature des impuretés du métal. Elle est représentée par le chiffre moyen de 2,78, celle du cuivre (cuivre électrique commercial) étant de 1,67 microhm-centimètre à 0° C. La présence du fer et du silicium relève cette résistivité; le coefficient de température est d'autant plus élevé que la teneur du métal en impuretés est elle-même plus grande. Cette propriété

constitue, avec la thermo-électricité, une méthode sûre pour apprécier la pureté du métal. M. Pécheux a trouvé les chiffres de :

$$\rho_0 = 2,72; \quad \rho_0 = 2,75; \quad \rho_0 = 2,80,$$

pour la résistivité en microhms-centimètre à 0° de trois échantillons d'aluminium commercial ; les mesures étaient faites au pont à corde de Wheatstone; les échantillons, convenablement recuits et contournés en spirale, étaient chauffés dans un bain de paraffine ; les températures étaient fournies par un pyromètre nickel-cuivre dont la soudure chaude se trouvait au centre des spirales d'aluminium.

Dans la formule classique :

$$\rho t = \rho_0 (1 + \alpha t + \beta t^2),$$

le coefficient α varie, pour l'aluminium, avec la teneur en impuretés entre 0,0040 et 0,0046. Le coefficient β a pour valeur 0,000 004; il est donc négligeable dans les mesures et calculs industriels.

Températures de fusion et de volatilisation. — L'aluminium fond vers 630°. Cependant, cette température, assez difficile à déterminer, varie aussi avec la pureté et la nature du métal.

D'après Day et Sosmann, le point de fusion de l'aluminium serait de 638°; cette détermination, faite au laboratoire de l'Institut Carnegie de Washington, a été effectuée dans une atmosphère d'azote à l'aide d'un couple platine-rhodium et rapportée au thermomètre à azote.

D'après Kohn-Abrest, le point de fusion varierait entre 625 et 630° (aluminium industriel préparé au four électrique); dans ses expériences, il a fait usage de lames d'aluminium très minces que l'on introduisait dans des nacelles de porcelaine placées au milieu d'un tube chauffé électriquement. La lame était recourbée à angle droit. En regardant suivant l'axe du four, on saisissait le moment où la partie droite de la lame s'affaisse; cet affaissement n'est pas complet, comme il arrive avec l'or et l'argent, car l'aluminium ne fond pas entièrement; la matière fondue est toujours recouverte d'une carcasse plus ou moins oxydée qui rend difficile l'observation exacte du point de fusion.

Chauffé au-dessous de sa température de fusion, l'aluminium devient plastique et peut être forgé et soudé à lui-même si l'on opère dans des conditions convenables. C'est un métal fixe : il ne se volatilise complètement et rapidement qu'à de très hautes températures telles que celles produites par le four électrique. Si l'on chauffe en effet ce métal pendant cinq minutes environ avec un courant de 250 ampères sous 70 volts, on obtient sur le tube froid de l'appareil une agglomération constituée par une poudre grise ; agitée dans l'eau, elle laisse tomber au fond du verre de petites sphérules de métal. Ces sphères, qui ont l'éclat métallique, dégagent de l'hydrogène par l'action des acides chlorhydrique ou sulfurique. On peut également recueillir sur un carton d'amiante de petites sphères recouvertes d'alumine Al_2O_3 produites par l'oxydation des vapeurs métalliques sortant du four.

Dans le vide, la volatilisation de l'aluminium se produit à partir de 1.100° ; elle est influencée par la présence du silicium et du carbone, mais elle est totale en l'absence de ces deux éléments."

Pour se rendre compte de ce fait, on se sert d'aluminium très pur et pour éviter l'action des vapeurs d'aluminium sur les silicates (creusets) et l'action consécutive du silicium mis en liberté sur l'aluminium non volatilisé, on peut se servir de nacelles en alumine placées dans un tube de fer doux. Celui-ci est lui-même introduit dans un tube en porcelaine. Il est ainsi facile de voir que la volatilisation du métal pur commence à 1.100° . La rapidité de la volatilisation augmente considérablement avec la température. En prenant soin d'éviter les causes qui l'empêchent (présence du silicium, du carbone, etc.), on constate qu'elle est totale au bout de 30 heures à 1.200° ; elle ne l'est pas, même après 73 heures, à 1.100° . En élevant la température, on arrive à activer la volatilisation de l'aluminium dans le vide et on se rapproche des résultats obtenus par Moissan, qui a réussi à distiller à l'air ce métal au bout de quelques instants en le chauffant dans l'arc électrique. Mais on ne produit qu'une volatilisation d'environ 40% de la substance en 20 heures et à 1.100° ; le reste est beaucoup plus difficile à volatiliser.

A l'état liquide, l'aluminium se prête très bien à l'obtention des

pièces de fonderie par coulée et moulage, comme nous le verrons plus loin (V. *Fusion de l'aluminium*, p. 69).

Dureté. — Tournage et perforage de l'aluminium. — L'aluminium possède une certaine dureté sclérosopique qui, jointe à sa propriété de ne pas se laisser rayer par des matières plus dures que lui (¹), rend parfois son travail difficile. C'est ainsi que pour le tourner, il faut faire usage d'un outil très tranchant, en ayant soin de réserver un espace suffisant pour l'évacuation des tournures; la pièce d'acier doit tourner avec une très grande rapidité combinée avec un avancement lent; il est de plus nécessaire d'employer une grande quantité de lubrifiant, eau de savon ou paraffine.

On perfore ce métal à l'aide d'un foret à diamant ayant un jeu suffisant; une mèche hélicoïdale pourrait gripper. Les filets de vis peuvent être obtenus au taraud ordinaire; on graisse avec un peu d'huile légère.

Examiné au microscope, l'aluminium offre une structure intérieure à grains très fins d'un blanc mat. Par le frottement, il devient plus homogène, plus lisse et adhère aisément à l'acier. Aussi a-t-il été utilisé avec succès pour l'aiguillage des lames d'acier; celles-ci prennent rapidement un fil très fin comparable à celui que donnent les meilleures pierres.

Pour la gravure du métal, le burin glissant à sa surface au lieu de l'entamer, on humecte cette dernière avec un mélange de quatre parties d'essence de térébenthine et une partie d'acide stéarique; ce dernier peut être remplacé par de l'huile d'olive.

La dureté Brinell de l'aluminium varie avec le traitement. Nous donnons ci-dessous les résultats d'un essai effectué sur un aluminium de première qualité contenant 99,69 % Al, 0,45 % Si, 0,14 % Cr et 0,05 % Fe. Les expériences ont été faites avec une bille de 1 millimètre, sous une pression de 5 kilogrammes. Les recuits ont été prolongés à chaque température pendant 5 minutes. On a obtenu les chiffres suivants :

(¹) Certaines matières très dures glissent sur sa surface comme s'il était recouvert d'un enduit huileux. Cette particularité doit sans doute être attribuée à la fine cohésion des molécules de métal très petites et très serrées les unes contre les autres.

Traitement.	Dureté II.
Aluminium fondu.....	23,7
— écouli à refus.....	38
— recuit à 250°.....	38
— — 340°.....	38
— — 350°.....	29
— — 360°.....	20
— — 400°.....	18

La disparition de l'écrouissage se produit principalement entre 350 et 400°. On voit que l'aluminium recuit est plus mou que le même métal primitivement fondu

Ductilité et malléabilité. — La *ductilité* de l'aluminium est très grande : elle le place immédiatement après l'or, l'argent et le platine. Il en est de même de sa *malléabilité* qui n'est surpassée que par celle de l'or et de l'argent. Par suite, ce métal peut être tréfilé et laminé avec facilité. Les procédés employés sont à peu près identiques à ceux utilisés pour le cuivre. La billette est d'abord laminée à chaud (300° environ), puis réduite par tréfilage à la dimension voulue. La graisse froide est alors employée comme lubrifiant, tandis qu'on se sert de paraffine pour la fabrication des fils très fins à la filière. Des fils de 30 dixièmes de diamètre peuvent être obtenus de cette façon et remplacer ceux de cuivre, de laiton ou de maillechort dans toutes leurs applications.

On fabrique également des profilés, des ronds et des tubes en aluminium, à une température voisine de 80°, en utilisant la presse hydraulique. L'aluminium doux en feuilles peut être étiré, estampé ou forgé à la presse sous différentes formes; comme lubrifiant on emploie l'huile de noix de coco.

Ténacité et élasticité. — La *ténacité* ou *résistance à la rupture* de l'aluminium varie, dans une large mesure, suivant la méthode de traitement adoptée. La température du recuit et l'écrouissage, en particulier, ont une grande influence. Ainsi, pour un fil écouli dont la tension de rupture à 0° est de 18^{kg},7, la nouvelle tension de rupture tombe aux valeurs suivantes :

13 ^{kg} ,00 avec un recuit de.....	150°
7 ,68 —.....	250
5 ,76 —.....	300
2 ,4 —.....	400

L'aluminium recuit, soumis à un nouveau travail de laminage et de martelage, s'écroutit de nouveau et regagne une partie de sa ténacité initiale. C'est ainsi qu'on peut rendre aux soudures destinées à subir certains efforts mécaniques la résistance que l'échauffement leur a fait perdre.

L'aluminium *coulé* a une résistance à la rupture ne dépassant pas 12 à 15 kilogrammes et un allongement après rupture de 4 à 5 %; mais, sous l'action du laminage ou du tréfilage, il s'écroutit sensiblement et cette résistance monte à 18 kilogrammes et 25 kilogrammes suivant le diamètre; l'allongement après rupture est alors compris entre 2 et 4 %. Voici du reste quelques chiffres se rapportant à l'allongement pour des aluminiums traités différemment :

	Allongement.
Moulages au sable.....	25 %
Moulages en coquille.....	35
Barres laminées.....	35
Tôles laminées.....	26
Profilés.....	20
Fils étirés à froid.....	25
Fils étirés à chaud.....	30

D'une façon générale, on admet que la ténacité de l'aluminium est la moitié de celle du cuivre, soit, sur fil écroui, de 22 kilogrammes au lieu de 44 kilogrammes pour le cuivre. Cette infériorité n'empêche pas l'aluminium d'offrir pratiquement la même sécurité que le cuivre comme conducteur électrique; elle est en effet largement compensée par sa plus grande chaleur spécifique et la plus grande surface de rayonnement qu'il présente à égalité de densité de courant (v. p. 90).

II. — Soudure de l'aluminium.

Difficultés que présente la soudure de l'aluminium. — Qu'il s'agisse de soudure *autogène* ou de soudure *allogène*, c'est-à-dire constituée dans ce dernier cas par des alliages dans lesquels n'entre pas toujours l'aluminium, la soudure de ce métal n'est pas exempte de difficultés. Ces dernières, que nous allons examiner succinctement, tiennent à la fois des propriétés physiques, mécaniques et chimiques de l'aluminium.

a) *Formation d'alumine.* — Le principal obstacle à la soudure de l'aluminium par les procédés ordinaires est la formation d'alumine, Al_2O_3 , qui résulte de la simple exposition à l'air du métal fondu. Il est dès lors impossible d'unir deux lames composées d'aluminium sans chercher à détruire d'abord l'alumine formée; celle-ci peut même se produire à l'état de paillettes très longues, quoique fines, qu'il est difficile d'éliminer si elles viennent à se répartir dans le métal fondu. Cela est du reste d'autant plus à craindre que la densité de l'aluminium n'est que de 2,6, alors que celle de l'alumine est de 3,75, parfois même de 3,90 à température élevée.

En outre, l'alumine fond à peu près à 3.000° , tandis que l'aluminium fond à 650° environ.

Quelle que soit la chauffe, l'alumine se reforme sans cesse et tous les moyens mécaniques tentés pour l'éliminer de la masse métallique sont sans résultat; ils le sont d'autant moins que, de tous les oxydes, l'alumine est celui qui s'incorpore le plus volontiers aux métaux au lieu de chercher à s'isoler sous forme d'une mince pellicule à leur surface. Cette pellicule d'oxyde empêche la liaison complète de deux plaques d'aluminium chauffées à la température de fusion. C'est donc uniquement par voie chimique, c'est-à-dire par l'emploi d'un fondant convenablement choisi, qu'on peut arriver à dissoudre l'alumine; et, en fait, sans cette précaution, aucune bonne soudure n'est possible avec l'aluminium. Les meilleurs fondants sont à base de chlorures et fluorures de métaux alcalins et alcalino-terreux (V. p. 45).

b) *Élimination difficile des impuretés.* — Une autre difficulté de la soudure de l'aluminium est l'élimination difficile de ses impuretés et notamment du fer et du silicium qu'il contient toujours en petite quantité (fer, 1,25 %; silicium, 0,65 %). Les gaz occlus (azote, hydrogène) ne présentent pas un grave inconvénient alors même qu'ils se dégageraient au sein même de la soudure, pourvu

toutefois qu'ils ne soient pas en quantité suffisante pour rendre le métal poreux, ce qui lui enlèverait toute cohésion. Le fer et le silicium, au contraire, en s'unissant à l'aluminium, forment avec ce métal des alliages volumineux, très fragiles et très durs. Pendant la solidification de l'ensemble, ces alliages s'isolent dans le joint des cellules et peuvent, en quantité suffisante, constituer un réseau interrompu autour des grains de métal. Le réseau inter-

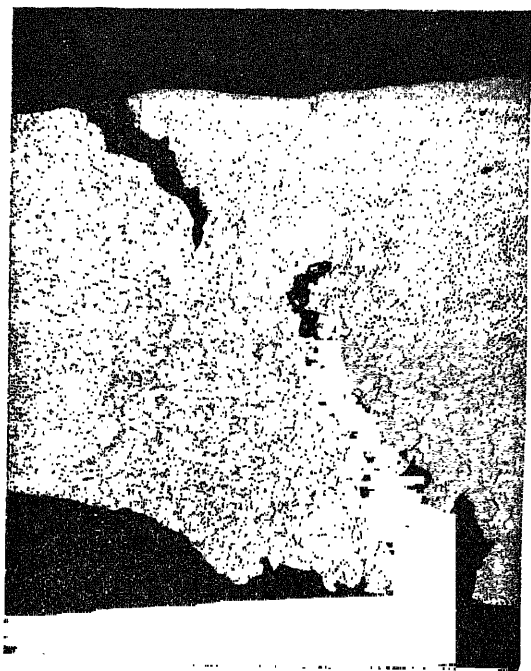


FIG. 6. — Fracture d'une soudure de tôle d'aluminium (à la suite d'une surchauffe) due aux impuretés du métal : fer, silicium. — Gross. : 50 diam. Polissage en bas-relief. (D'après R. Amédéo.)

cristallin ainsi formé est extrêmement fragile et facilite les cassures sous l'influence de chocs même très légers.

La figure 6 permet de se rendre compte de ce phénomène. Elle représente une soudure d'aluminium, grossie à 50 diamètres, après simple polissage en bas-relief. Le métal est constitué dans toute la partie comprenant la cassure par des grains d'aluminium

entourés d'un réseau volumineux visible sans aucune attaque. L'examen des environs de la cassure montre que les lignes de rupture contournant les joints des cellules se propagent jusque dans l'alliage fer-aluminium-silicium formé aux dépens des impuretés du métal. D'après M. Amédéo, il ne se forme un réseau d'impuretés, c'est-à-dire fragile, que dans la portion du métal portée par le chalumeau à la température de fusion pendant l'exécution de la soudure. Le métal d'apport constitué par de l'aluminium pur ne présente aucun réseau semblable.

Il est donc nécessaire pour la fabrication d'objets en aluminium formés de plusieurs pièces réunies par soudure, de posséder un métal aussi pur que possible ; les corps étrangers, en se séparant pendant la solidification des bords de la soudure, créent des lignes de rupture. On a constaté cependant qu'un étirage modéré suivi d'un recuit à la température du bois fumant est susceptible d'améliorer les propriétés des soudures d'aluminium rendues ainsi fragiles.

c) *Coefficient de dilatation élevé.* — L'aluminium présente, au point de vue de sa soudure, un troisième inconvénient : un coefficient de dilatation élevé. Comme, en outre, sa ténacité est faible à chaud, il peut en résulter des ruptures de métal au cours du refroidissement sous l'influence du retrait. Il est donc indispensable, avant chaque opération de soudure, de prévoir ces phénomènes et d'évaluer approximativement leur intensité d'après la forme, les dimensions et la position réciproque des pièces à souder. Un chauffage préalable à 300 ou 400° dans un four spécial ou à l'aide d'un chalumeau est donc souvent nécessaire. On peut également rendre libres la dilatation ou le retrait de certaines régions du métal par des traits de scie judicieusement répartis et qui limitent ainsi l'effet de la chauffe préalable.

Cet inconvénient du coefficient de dilatation élevé de l'aluminium est en partie annulé par sa grande conductibilité calorifique, qui tend à répartir rapidement et uniformément la chaleur dans toute la masse de métal.

d) *Point de fusion peu élevé.* — Le point de fusion assez bas de l'aluminium, 650°, est aussi un inconvénient pour sa soudure,

étant donné, d'une part, la température que fournissent la plupart des chalumeaux même peu poussés et, d'autre part, la friabilité de l'aluminium au voisinage de son point de fusion. Comme, par contre, il est très fluide une fois fondu, de grandes précautions sont nécessaires pendant l'exécution des soudures pour éviter à la fois des trous résultant de la fusion rapide du métal et des ruptures par dilatations inégales.

e) *Alliages difficiles de l'aluminium avec les métaux soudeurs.* — L'aluminium ne fait pas un alliage rapide avec les soudures habituelles à une température aussi basse que les autres métaux. Pour le souder, il faut donc opérer à une température assez élevée, ce qui se traduit par les inconvénients signalés plus haut. Enfin l'aluminium ne s'allie avec le plomb qu'avec une grande difficulté, ce qui lui rend peu applicables les soudures renfermant une forte proportion de ce métal.

Ces différents inconvénients militent en faveur de la soudure autogène de l'aluminium qui conduit toujours à d'excellents résultats lorsqu'elle est exécutée avec soin et d'après les particularités relatives à l'épaisseur et à la forme des pièces à souder ; elle évite notamment la corrosion plus ou moins rapide du métal sous l'action des liquides acides ; on sait en effet que toute soudure hétérogène entraîne, par la seule présence de l'aluminium et d'un liquide salin ou acide, la formation d'un couple voltaïque qui amène la destruction partielle du métal par dissolution progressive et formation de trous, piqûres, etc. Cette action est d'autant plus vive que le métal principal de la soudure est plus éloigné de l'aluminium dans l'échelle électrochimique des métaux.

Exécution des soudures. — *Flux décapant.* — La première opération, dans l'exécution de la soudure, est l'emploi d'un fondant ou flux décapant convenable. Ce fondant, destiné à éliminer l'alumine, doit répondre aux conditions suivantes :

1° Être plus fusible que l'aluminium, de manière à éviter les trous dans le métal sous l'influence d'une flamme trop chaude ;

2° Posséder, une fois fondu, une densité assez faible pour écarter toute chance d'interposition dans le métal fondu à son contact ;

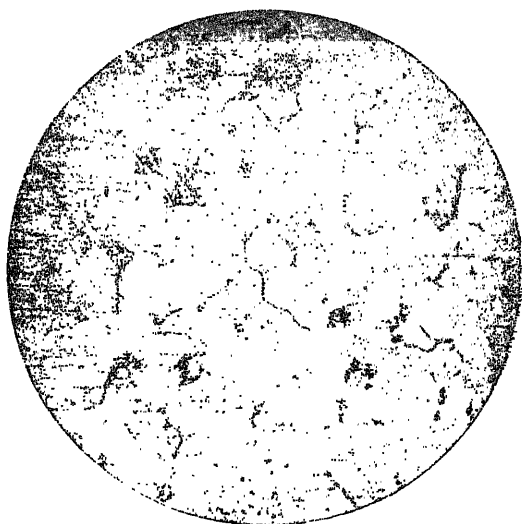


FIG. 7. — Échantillon prélevé dans une soudure aluminium-zinc faite sans poudre décapante : nombreux amas d'alumine. — Gross. : 400 diam.

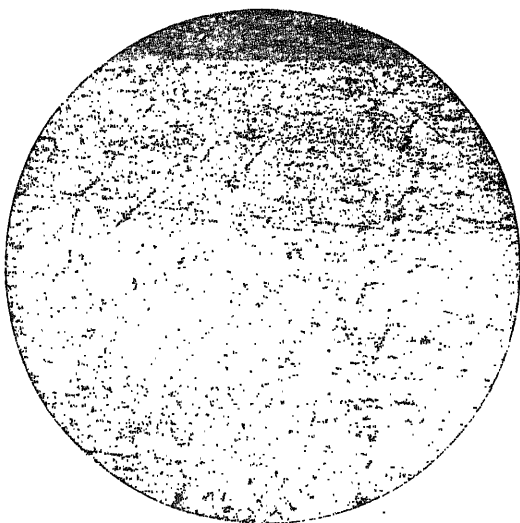
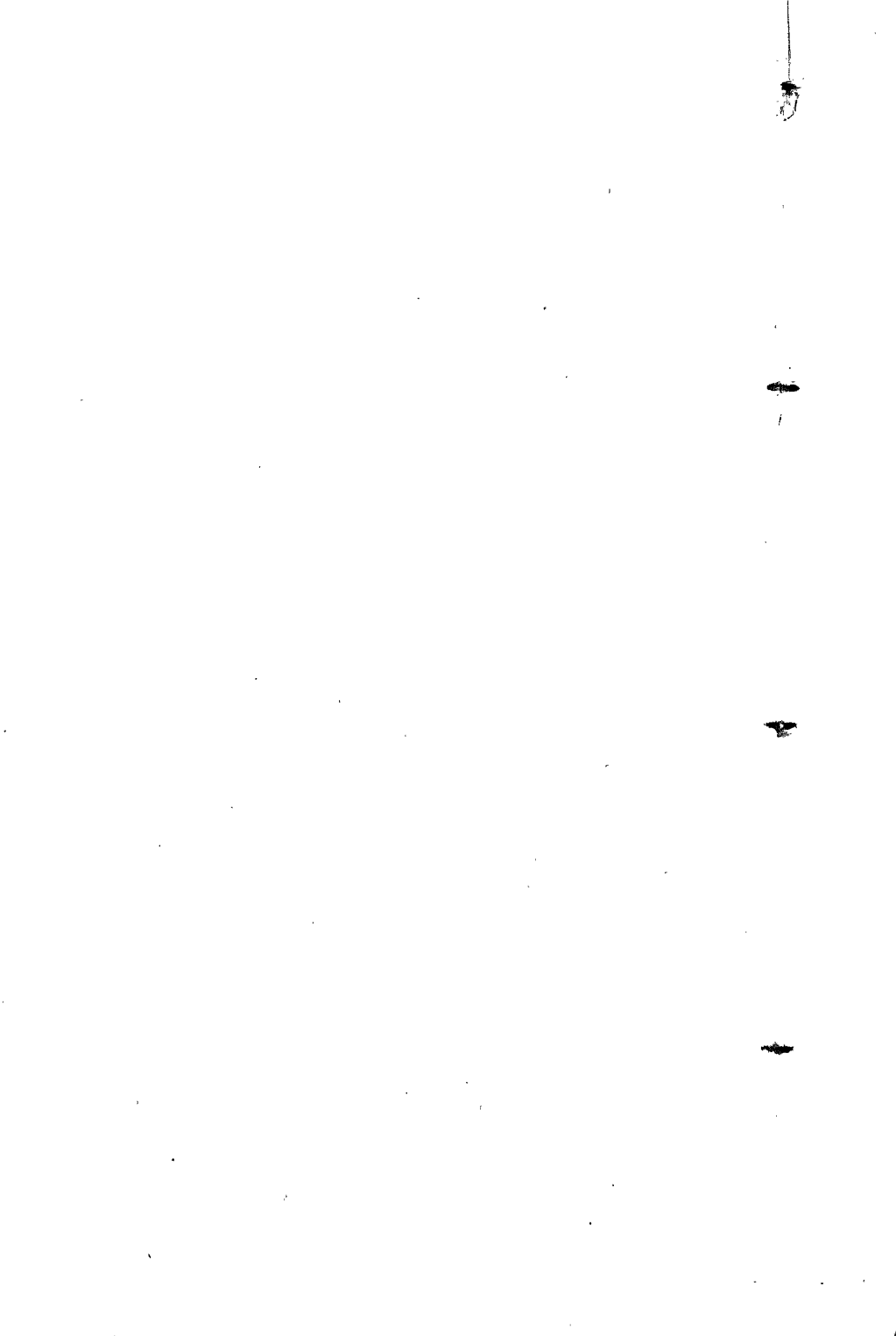


FIG. 8. — Échantillon prélevé dans une soudure aluminium-zinc faite avec poudre décapante : traces d'alumine. — Gross. : 400 diam.



3° Ne pas être fluide, mais posséder au contraire une viscosité suffisante pour ne pas s'écarter de la ligne de soudure et former à la surface du métal fondu une couche protectrice ininterrompue ; cela évite une réoxydation locale des parties métalliques primitivement décapées ;

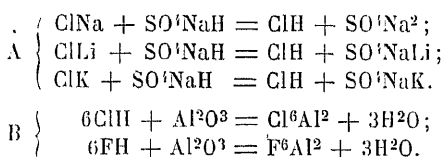
4° Assurer la destruction complète de l'alumine, soit par dissolution, soit par la formation de composés nouveaux faciles à éliminer ensuite de la surface du métal.

Le composé résultant de la combinaison de l'oxyde d'aluminium et de l'agent décapant doit ainsi être lui-même très fusible, peu dense et même, si possible, volatil pour éviter toute interposition de matière à l'intérieur de la soudure ou du métal avoisinant.

On a essayé un grand nombre de corps et de mélanges de sels pour arriver à un résultat favorable. Après bien des tentatives infructueuses, l'Union de la soudure autogène a adopté un mélange de chlorures alcalins, de fluorure de potassium et de bisulfate de soude répondant aux pourcentages suivants :

Chlorure de lithium.....	15 %
Chlorure de potassium.....	45
Chlorure de sodium.....	30
Fluorure de potassium.....	7
Bisulfate de soude.....	3

Sous l'influence de la chaleur, le bisulfate décompose les chlorures et le fluorure avec dégagement d'acides chlorhydrique et fluorhydrique. Ces derniers attaquent l'alumine avec une grande énergie et formation de chlorure et de fluorure d'aluminium, composés volatils. Ces réactions prennent naissance conformément aux équations chimiques suivantes :



La préparation du mélange des différents sels exige certaines précautions. Elle est assez délicate, les sels devant d'abord être soi-

sement desséchés à l'étuve, puis mélangés de façon à éviter toute combinaison entre eux. Il est préférable de laisser aux spécialistes le soin de cette préparation. La pratique démontre que toute poudre décapante qui *grésille* sous l'action du chalumeau est de fabrication défectueuse.

L'utilité d'une poudre décapante pour la soudure de l'aluminium démontre par nombre de faits et essais malheureux résultant de son absence. Dans ce dernier cas, les lignes ou surfaces soudées sont des portions simplement collées qu'un simple choc suffit souvent à séparer.

L'examen micrographique de soudures réalisées avec et sans flux décapant permet, peut-être encore mieux, de se rendre compte de l'utilité de ce dernier d'après la proportion d'alumine restée dans le métal de soudure après son exécution. La figure 7 représente, d'après

Amédéo, un échantillon prélevé dans une soudure d'alliage aluminium-zinc ayant réuni deux plaques de ce même alliage sans emploi de poudre décapante. Les amas d'alumine y sont nombreux, les paillettes ont une grande longueur et, en se réunissant par groupes, forment des réseaux compromettant sérieusement la résistance de l'alliage. Si l'on examine maintenant la figure 8, représentant la même soudure, mais avec emploi de poudre décapante, on aperçoit que des traces très faibles d'alumine. Au point de vue mécanique, l'alliage est plus souple et plus résistant que le précédent.

On a même constaté que, souvent, l'alliage soudant est plus résistant que les plaques d'alliage soudé. Cela provient de ce que, lors de la fabrication des moulages en alliages d'aluminium, on coule généralement ces derniers sans ajouter de fondant au creuset; l'écume formée au cours de la fusion ne peut s'éliminer et se trouve dans l'alliage. Au point de vue qui nous occupe, on peut dire que, souvent, une pièce soudée avec flux décapant est plus résistante après réparation ou soudure que ses différentes parties ou la pièce neuve.

Mode opératoire. — Le flux décapant s'emploie généralement en plaçant dans le flacon qui le contient l'extrémité de la tige du métal d'apport. Celui-ci est constitué par de l'aluminium pur dans

le cas de la soudure de pièces formées de ce métal et, généralement, par des alliages d'aluminium et des métaux constituant les pièces à souder lorsqu'on traite des alliages d'aluminium.

Au début de l'opération, on chauffe l'extrémité de la tige du métal d'apport au chalumeau pour que la poudre adhère, tout en évitant une dose exagérée. La puissance du chalumeau à employer varie naturellement avec l'épaisseur de métal à souder. Dans le cas de l'utilisation du chalumeau à acétylène (flamme oxy-acétylénique), on emploiera les débits suivants :

		Débit d'acétylène à l'heure.
Tôles de 1 millim. à 1 ^{mm} ,5.....	—	50 à 60 litres
— 2 —	—	120
— 3 —	—	225 à 250
— 5 —	—	500

Si les pièces à souder étaient préalablement chauffées en vue de supprimer les effets de dilatation et de retrait dont il a été question plus haut, il ne serait pas nécessaire d'utiliser des débits aussi importants.

Pour la soudure des tôles très minces, il n'est pas indispensable de faire usage du métal d'apport; il suffit, comme le montre la figure 9, d'agrafer les bords de la soudure (b) ou de les



FIG. 9. — Soudure de tôles très minces d'aluminium.

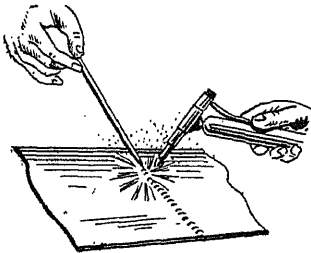


FIG. 10. — Tenue du métal d'apport et du chalumeau pour la soudure des tôles d'aluminium minces.

relever (a). Pour les soudures ayant deux ou trois millimètres d'épaisseur, le métal d'apport (fig. 10) doit être tenu en avant du chalumeau dans la direction des bords à souder. Au moment où commence la fusion de ces derniers, on le chauffe rapidement; il s'affaisse alors pour former un seul bain de fusion avec le métal des pièces à réunir.

Pour la soudure des pièces épaisses, les bords à réunir doivent être bien grattés à vif; un chanfrein est utile à partir de trois millimètres d'épaisseur (fig. 11).

Le métal d'apport *a*, préalablement chauffé et poudré, est fondu dans le bain de fusion du chanfrein. La vitesse d'avancement n'est pas régulière. La première amorce de fusion est relativement longue en raison de la perte de chaleur par conductibilité. A mesure que

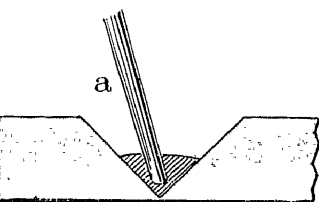


Fig. 11. — Soudure autogène de pièces épaisses d'aluminium. (*a*, métal d'apport.)

les bords de la soudure s'échauffent, l'opération devient de plus en plus rapide. Il faut alors localiser le plus possible la chaleur le long de la ligne de soudure pour éviter la fusion et l'affaissement des parties environnantes.

D'après Granjon et Rosemberg, il convient d'éviter le contact du dard du chalumeau avec le métal prêt à fondre ou déjà fondu, car

la haute température de cette partie de la flamme entraînerait la formation de trous difficiles à boucher. L'écartement du dard varie entre 5 et 20 millimètres, suivant la puissance du chalumeau.

Il est impossible de donner des renseignements très précis, car l'épaisseur du métal, l'importance et la forme des pièces à réunir jouent un grand rôle dans l'exécution pratique des soudures. En outre, une certaine pratique est nécessaire pour obtenir des lignes



Fig. 12. — Soudure d'aluminium effectuée avec un fil d'apport trop gros.

de soudures régulières et d'un bel aspect. C'est ainsi que l'emploi d'un fil d'apport trop gros produit un bourrelet superficiel (fig. 12) et un manque de pénétration; l'usinage d'une telle soudure est inutilement coûteux. L'emploi d'un chalumeau trop puissant empêche la progression normale du travail; d'où trous, affaissements et col-

lages (*fig. 13*). Dans une très bonne soudure (*fig. 14*), le métal est disposé régulièrement par plages formant dans leur ensemble une bande recouvrant les bords de métal et sans épaisseur exagérée.

Lorsque la soudure est terminée, on la laisse se refroidir lente-

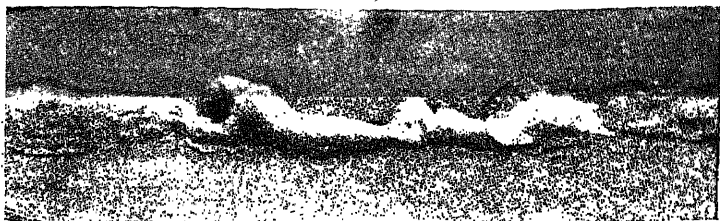


FIG. 13. — Soudure d'aluminium effectuée par l'emploi d'un chalumeau trop puissant.

ment, puis on la frotte avec une brosse dure et sous l'eau courante, de façon à éliminer les sels qui pourraient peu à peu corroder le métal et qui ont pris naissance par l'apport du flux décapant. Lorsque les pièces ont une forme qui s'y prête, on peut ensuite les marteler légèrement à froid de façon à leur donner la texture et l'aspect extérieur du métal laminé. Un léger recuit fait disparaître l'écaillage.

La soudure par recouvrement, qui donne d'excellents résultats avec certains métaux (tôles de fer et d'acier extra-doux), ne peut convenir à l'aluminium. On sait que dans ce procédé, la préparation des pièces se fait comme s'il



FIG. 14. — Soudure d'aluminium normale.

s'agissait d'une soudure à la forme; les bords des tôles constituent des amorces qui se recouvrent; la ligne à souder est chauffée par petites portions au moyen d'un chalumeau et, quand la température soudante est atteinte, on martèle pour opérer la liaison des bords. Quelles que soient les précautions prises pour éviter, avec

l'aluminium, la formation d'alumine pendant le chauffage au chalu-meau, il se produit généralement une couche plus ou moins épaisse de cet oxyde ; si l'on impose après refroidissement à la partie sou-dée une flexion par choc, on obtient toujours le décollement des amorces pour un angle de pliage à peine inférieur à 180° .

Alliages pour soudures. — Il existe actuellement dans le com-merce des alliages spéciaux pour soudure de l'aluminium dont la composition est très variable.

Lorsque cette dernière est à peu près la même que celle de l'al-liage constituant les pièces à unir ou à réparer, ils donnent des résultats satisfaisants ; mais il en est rarement ainsi, et la soudure, incontestablement hétérogène, est généralement très altérable à l'air et peu résistante. C'est le cas de la suivante destinée, d'après l'inven-teur, à la réparation des carters d'aluminium pour automobile :

Cuivre.....	10 %
Plomb.....	0,5
Zinc.....	89
Fer, antimoine, cadmium.....	0,5

Il n'y a pas trace d'aluminium dans cet alliage d'apport et le zinc y existe, par contre, en proportion très exagérée.

L'*étamage* de l'aluminium donne, par contre, de bons résultats quoiqu'il soit un peu compliqué en pratique. On peut opérer de différentes façons. Dans le procédé Melsen, les pièces sont d'abord décapées à l'acide sulfurique étendu, lavées à l'eau, plongées dans une solution de soude à 10 %, puis dans le bain suivant :

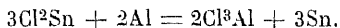
Sulfate de nickel.....	40
Chlorure d'ammonium.....	20
Acide citrique.....	2
Eau.....	1.000

Elles se recouvrent ainsi d'une légère couche de nickel. Le dépôt d'étain est obtenu en les plongeant dans un second bain composé ainsi qu'il suit :

Chlorure d'étain.....	2
Pyrophosphate de soude.....	20
Eau.....	1.000

Sitôt le dépôt d'étain réalisé, on peut souder d'après les procédés habituels.

Dans le procédé Mallet et Westinghouse, on met à profit la réaction :



Le chlorure stanneux Cl^2Sn est d'abord fondu pour le priver de son eau et coulé en petits bâtons. On passe un de ces bâtons sur l'aluminium chaud ; le composé fond et il se forme, outre le chlorure volatil Cl^3Al , un alliage d'aluminium et d'étain qui se laisse facilement étamer et souder. On peut simplifier l'opération en saupoudrant les parties à réunir d'un peu de chlorure stanneux et en chauffant jusqu'à complète disparition des fumées blanches de chlorure d'aluminium.

Soudure des alliages d'aluminium. — La soudure des alliages d'aluminium présente le même intérêt que celle de l'aluminium en raison de leurs nombreuses applications industrielles. Comme il a été dit plushaut, il faut en général, comme métal d'apport, employer une composition de même teneur que les pièces à souder. Cependant, ces alliages offrant des combinaisons très variées, il faut prendre soin de ne pas utiliser une flamme trop chaude qui provoquerait des affaissements aux points de plus faible fusion.

La soudure des principaux alliages d'aluminium sera étudiée pour chaque alliage isolément. Voir notamment : BRONZES D'ALUMINIUM, ALLIAGES ZINC-ALUMINIUM, DURALUMINIUM.

Soudure électrothermique. — La soudure électrothermique de l'aluminium est parfaitement possible lorsqu'on possède l'outillage nécessaire. Elle présente l'avantage d'être très rapide et de donner de bons résultats. Les pièces à souder, fixées dans des mâchoires en relation avec les bornes du courant, sont mises en contact après avoir été saupoudrées de flux décapant. Si l'on se sert de courant continu, l'alumine est électrolysée au fur et à mesure de sa dissolution dans le mélange décapant, par un mécanisme analogue à celui qui donne naissance à l'aluminium dans l'extraction de ce métal ; elle repasse à l'état d'aluminium métallique et, au lieu d'être un obstacle à la réalisation d'une bonne soudure, elle

aide ainsi à sa parfaite exécution. Le métal d'apport n'est pas essentiel, les bords des pièces à souder entrant en fusion par le seul passage du courant.

L'inconvénient de cette méthode est d'exiger une installation assez coûteuse et une grande habitude de la part des soudeurs pour éviter des intensités de courant exagérées qui feraient couler le métal au lieu de réunir les pièces à souder, mais on a eu raison de ces difficultés par la pratique. Il en est de même de la formation d'alumine. Autrefois, cette substance, qui est un isolant, empêchait les surfaces métalliques de se souder. Avec les machines à résistance dans lesquelles intervient la pression des pièces l'une contre l'autre, la couche d'oxyde est rompue et poussée de côté; elle laisse ainsi les surfaces de métal venir en contact et se souder.

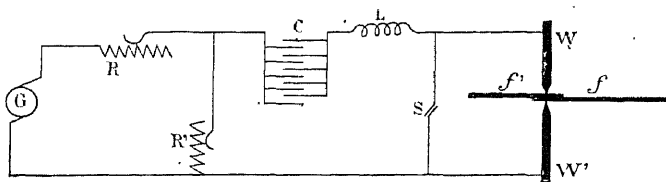


FIG. 15. — Soudure électrothermique des fils d'aluminium : dispositif de l'installation.

Le procédé Skinner et Chubb s'applique surtout à la soudure des *fils d'aluminium* et repose sur la constatation suivante : des fils de cuivre ou d'aluminium se soudent automatiquement aux plaques d'aluminium d'un condensateur électrolytique quand une étincelle jaillit entre les fils et les plaques. Cette soudure est particulièrement résistante au point de vue mécanique, chaque fois que le contact se produit avec choc.

Cette observation permet de réaliser la soudure rapide et économique de la plupart des fils métalliques et donne notamment d'excellents résultats avec ceux en aluminium. L'installation permettant de réaliser cette opération comprend (*fig. 15*) une génératrice à courant continu G qui charge, à travers une résistance R, un condensateur électrolytique C, aux bornes duquel on peut faire varier la tension à l'aide d'un rhéostat R'. Le circuit du condensateur contient une self-induction L, un interrupteur à ressort S et,

en parallèle avec ce dernier, deux pinces à fil W et W', sortes d'électrodes dont l'une W' est fixe; l'autre W peut en être brusquement rapprochée jusqu'au contact.

Les fils à souder f et f' sont pris dans ces pinces, puis coupés au ras de leur point d'insertion à l'aide d'une pince coupante, de façon que les arêtes des sections de ces deux fils soient dirigées à peu près à l'angle droit l'une sur l'autre.

Pour effectuer la soudure de ces fils, on fait d'abord fonctionner la génératrice G en maintenant fermé l'interrupteur S; puis, après avoir mis les fils f et f' en place dans les pinces, on ouvre cet interrupteur et on déclanche la pince W de façon à amener les deux fils en contact. La soudure est instantanée et sa résistance mécanique est égale à celle du reste du fil. La self-induction L, introduite dans le circuit de C, a pour fonction d'abaisser la fréquence de la décharge oscillante se produisant entre les fils à souder au moment où le contact va se produire, et d'empêcher que l'arc jaillissant entre leurs extrémités soit éteint avant leur contact final; cela rendrait impossible, en effet, une soudure complète des fils en présence.

Ce procédé de soudure a été désigné sous le nom de *soudure par choc électrique*. Pour souder deux fils d'aluminium de 1 millimètre environ de diamètre, avec une tension initiale de 210 volts, l'intensité atteint jusqu'à 500 ampères; mais, comme la durée de passage n'est guère que de 0,0012 seconde, la consommation effective de courant est insignifiante. Il est également utilisable à la soudure des fils d'acier, de cuivre, de laiton, etc., dont l'élévation de température modifie ordinairement sa structure intérieure. Les résultats sont parfaits quant à la conservation des qualités des métaux soudés, l'échauffement restant localisé aux points de soudure et l'opération étant très rapide.

Applications diverses. — La soudure autogène de l'aluminium et de ses alliages s'est considérablement développée dans ces dernières années. Non seulement elle sert à réparer les pièces brisées, mais elle est appliquée d'une façon courante pour la confection, par assemblage, de nombreux objets usuels: bouteilles et bidons légers, récipients de grandes dimensions, etc. On l'emploie aussi

pour le raboutage des fils, câbles et barres électriques, la fixation de viroles, l'assemblage des pièces d'aéroplanes, la fabrication de nombreuses pièces de machines et d'outillage.

III. — Propriétés chimiques.

Action des acides et de l'eau. — Les propriétés chimiques de l'aluminium varient suivant qu'il est pur ou qu'il renferme des matières étrangères ou d'autres métaux; elles sont modifiées en outre par l'état physique du métal : aluminium en lingot, en lames minces, en poudre, etc.

Parmi les acides, l'*acide chlorhydrique* est celui qui exerce l'action la plus vive, car il dissout facilement l'aluminium à froid. Les solutions d'*alcalis* (potasse, soude), libres ou carbonatés, l'attaquent rapidement en donnant des aluminates alcalins solubles; il en résulte que, pour le nettoyage courant des objets et ustensiles de ménage en aluminium, l'emploi des cristaux de soude et des savons très alcalins doit être prohibé.

Dans l'*eau pure* distillée ou potable, à froid et à chaud, l'aluminium pur est pratiquement inaltérable; de même, les *acides nitrique, sulfurique et acétique* ne l'attaquent pas sensiblement à froid, mais à chaud les deux premiers acides exercent une attaque sensible sur le métal commercial. S'il n'est pas pur, il risque de perdre une grande partie de sa résistance aux agents chimiques et de se corroder au contact de l'air et de l'eau. La corrosion de ce métal en contact avec l'eau pure, l'*eau acide* ou la vapeur d'eau, en présence de métaux étrangers (cuivre notamment) ou d'impuretés (fer, silicium, sodium) est due à un phénomène d'électrolyse au cours duquel l'aluminium, qui dans le cas du cuivre est électropositif par rapport à ce métal, s'ionise plus ou moins rapidement. Il se forme donc un couple et l'action, c'est-à-dire l'attaque de l'aluminium, est d'autant plus vive et plus rapide qu'il est plus chargé d'impuretés ou que l'électrolyte est plus acide.

En ce qui concerne l'action de l'*eau* sur le métal commercial préparé au four électrique, elle est faible, mais cependant sensible : c'est du reste en attaquant par de l'eau une lame d'aluminium que

l'on dose le sodium qu'il renferme. La poudre de ce métal est encore plus attaquable, ainsi que l'a démontré Kohn-Abrest; mais l'action ne se produit que si l'on a chauffé le mélange; une fois amorcée, elle est extrêmement violente et donne lieu à un dégagement d'hydrogène important; il se forme des oxydes d'aluminium hydratés.

Action de l'oxygène et de l'air. — L'oxygène exerce une action des plus irrégulières. En effet, tandis qu'à l'état de métal compact l'aluminium n'est attaqué que très superficiellement lorsqu'on le chauffe dans l'air ou même dans l'oxygène, il n'en est plus de même de la poudre d'aluminium (V. p. 102). Cette dernière renferme toujours un oxyde dû à l'oxydation partielle du métal à l'air, à la température ordinaire. Mais l'augmentation de poids de l'aluminium chauffé à l'air n'est pas due seulement à la fixation d'oxygène; l'azote intervient également, l'absorption de ce gaz étant dans certains cas très importante. En chauffant de la poudre d'aluminium à 600° dans l'air, Kohn-Abrest a constaté qu'elle s'oxyde partiellement sans fixation d'azote et que l'oxydation atteint rapidement sa limite; à 800° et au-dessus, l'azote et l'oxygène se fixent simultanément sur le métal jusqu'à ce qu'il ait complètement disparu.

L'inaltérabilité apparente de l'aluminium à l'air est due en réalité à la formation d'une pellicule mince, continue et imperméable d'alumine. Cette pellicule, en outre très adhérente et se reformant dès que le métal est mis à nu, protège ce dernier contre toute oxydation ultérieure. C'est grâce à la présence constante de cette couche d'alumine que l'on peut soumettre, sans oxydation notable, un lingot d'aluminium, à la température du chalumeau oxyhydrique. A l'état divisé, on réussit très bien, au contraire, comme nous l'indiquons plus loin (V. ALUMINOTHERMIE, p. 77), à le faire brûler dans l'oxygène et même dans l'air. De tous les éléments, l'aluminium est le métal qui, en se combinant à l'oxygène, dégage la plus grande quantité de chaleur, soit 380 calories.

Les causes véritables de l'altérabilité de l'aluminium ne sont du reste pas entièrement connues, la corrosion et la désintégration de ce métal étant dues à un assez grand nombre de facteurs parmi

lesquels il faut comprendre, outre les actions chimiques et électro-chimiques lentes, l'état moléculaire et les traitements mécaniques subis par le métal (V. p. 62).

L'aluminium agit comme réducteur dans un grand nombre de cas, réduit au rouge blanc l'anhydride borique, la silice, de nombreux oxydes ; il s'unit à la plupart des métaux en formant des alliages dont quelques-uns ont reçu d'importantes applications (V. *Alliages*, p. 119 et suiv.).

Enfin, chauffé au-dessous du rouge dans un mélange de chlore et d'oxygène, il devient incandescent et se délite en donnant naissance à des lamelles d'oxychlorure d'aluminium. Avec le carbone et l'azote, il forme des carbures et azotures d'aluminium (Voir p. 253 et suiv.).

Principales impuretés de l'aluminium industriel. — Les principales impuretés que l'on rencontre dans l'aluminium industriel sont le *fer*, le *silicium*, la *silice*, le *carbone*, l'*azote*, le *sodium*, le *cuivre*, le *titane* et le *bore*. Mais ce sont surtout le fer, le silicium, le carbone et le sodium qui constituent la majeure partie de ces impuretés : le fer provient du minerai, des électrodes et des matières constituant le four ; le silicium a la même origine, mais il est dû particulièrement à l'alumine employée ; le carbone provient naturellement des électrodes et le sodium du minerai, la cryolithe, qui est une fluorure double d'aluminium et de sodium. On obtient couramment aujourd'hui un métal ne renfermant que de faibles quantités de ces différentes impuretés dont la présence modifie toujours, plus ou moins, les propriétés chimiques, mécaniques et électriques de l'aluminium.

Nous donnons ci-dessous la composition d'un échantillon provenant de la *British Aluminium Co* :

Aluminium.....	99,67 %
Fer.....	0,21
Silicium.....	0,12
Sodium.....	Traces

C'est donc un aluminium industriel très pur.

Une analyse d'échantillons d'aluminium obtenu par les procédés

électrochimiques actuels a donné les résultats moyens suivants :

Fer	0,25 à 0,70 %
Silicium	0,15 à 0,60
Silice	0,30 à 0,50
Carbone	0,20 à 0,30
Azote	0,10 à 0,15
Cuivre	0 à 0,006
Sodium	0 à 0,006
Aluminium (par différence)	99 à 97,738

Voici enfin, d'après M. Kohn-Abrest, l'analyse d'une poudre d'aluminium, soigneusement dégraissée⁽¹⁾ :

Aluminium	95,930 %
Fer	0,613
Silice	0,259
Silicium insoluble	0,418
Carbone total	0,310
Azote	0,152
Sodium	0,006
Cuivre	Néant
Titane	Traces
Aluminium de la partie insoluble dans les acides	0,024
Oxygène (par différence)	2,288

Il résulte de cette dernière analyse que sur 100 grammes de cette poudre, une certaine partie d'aluminium existe à l'état de combinaison avec l'oxygène, ce qui montre bien l'existence d'oxydes d'aluminium préexistants.

Le pourcentage des oxydes d'aluminium, dans les poudres commerciales résultant du battage de feuilles minces (v. p. 102), peut atteindre 5,7 %.

Analyse de l'aluminium. — *Aluminium en plaques, rognures, lingots, etc.* — M. Kohn-Abrest a constaté qu'à des températures relativement basses (300°), le gaz acide chlorhydrique attaque rapidement l'aluminium (plaques, rognures, etc.) préalablement

⁽¹⁾ La quantité de suif ajoutée à la poudre d'aluminium, lors de sa préparation, atteint environ 0,20 à 0,25 %.

chauffé à la même température dans un courant d'hydrogène. Lorsque les proportions de fer sont faibles (0,5 à 0,6 %), il suffit de maintenir l'attaque pendant vingt-cinq minutes pour que la presque totalité du fer soit volatilisée. Dans ces conditions, le silicium semble se volatiliser à l'état de silicichloroforme, corps très volatil qui est complètement entraîné par le courant gazeux. Le dispositif employé à cet effet est le suivant :

a) Un appareil à hydrogène avec système purifiant et desséchant ;

b) Un appareil producteur de gaz acide chlorhydrique muni d'un système desséchant spécial. Le gaz chlorhydrique est produit

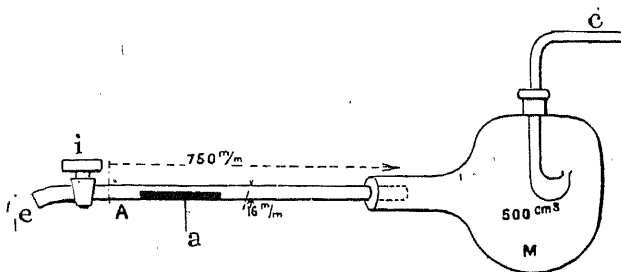


FIG. 16. — Dispositif de Kohn-Abrest pour l'analyse de l'aluminium.

par déplacement en faisant tomber goutte à goutte de l'acide sulfurique dans une solution pure d'acide chlorhydrique modérément chauffée.

Par le jeu d'un robinet à deux voies, on peut envoyer à volonté dans le tube à expérience A (fig. 16) l'un ou l'autre de ces deux gaz. La tubulure c communique avec un flacon-laveur M de 500 centimètres cubes, bouché à l'émeri. Le tube A est chauffé à partir de 7 à 8 centimètres de son orifice antérieur, en a, par une très courte grille à gaz (15 centimètres de longueur) recouverte d'une toile métallique. Un thermomètre est couché entre la toile et le tube.

Après dessiccation de l'appareil, on place l'échantillon d'aluminium dans une nacelle plate en porcelaine qu'on engage dans le tube en a. On chauffe à 300° pendant dix minutes dans un courant d'hydrogène, puis on fait passer un courant rapide de gaz chlorhydrique. Il faut refroidir le matras M par un courant d'eau froide

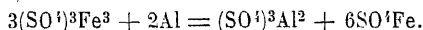
pour diminuer, autant que possible, les condensations de chlorure dans le flacon communiquant avec ce matras. La presque totalité se condense alors dans le tube A.

Après disparition des globules incandescents formés au cours de l'attaque, on arrête le dégagement de gaz chlorhydrique, et on laisse refroidir dans un courant d'hydrogène pour éliminer les dernières traces de gaz chlorhydrique.

Il ne reste plus qu'à dissoudre dans de l'eau le chlorure d'aluminium condensé dans tout l'appareil. Après avoir fermé les robinets du flacon-laveur faisant suite au matras, on remplace le bouchon *i* du tube A par un bouchon traversé par l'extrémité d'un tube coudé à un angle droit, en *e*, et contenant de l'eau distillée. Pour réaliser dans l'appareil un vide partiel, on met pendant un instant le second robinet du flacon faisant suite au matras en communication avec une trompe à eau, on ferme le robinet en communication avec la trompe et l'on ouvre ensuite le robinet communiquant avec le matras. L'eau du tube à ampoule peut ainsi rapidement pénétrer dans l'appareil et le chlorure d'aluminium condensé se trouve dissous sans perte. On dose sur des parties aliquotes du liquide le chlore et le fer : 1 de chlore correspond à 0,529 de fer et à 0,2535 d'aluminium. On peut ainsi doser très rapidement l'aluminium métallique.

Cette méthode s'applique du reste à tous les alliages de l'aluminium avec les métaux donnant au contact du gaz chlorhydrique des chlorures peu volatils, en ne dépassant pas 300° à 350° : aluminium-zinc, aluminium-cadmium, aluminium-magnésium, aluminium-cuivre, aluminium-chrome, aluminium-fer, etc.

Aluminium en poudre. — Lorsqu'il s'agit d'aluminium en poudre, on peut employer un procédé plus simple, basé sur l'action qu'exerce la poudre de ce métal sur le sulfate ferrique. La réaction est la suivante :



Une partie de fer équivalant à 0,46156 d'aluminium métallique. On part de 0^{gr},5 ou 1 gramme de poudre dégraissée par l'éther et séchée dans le vide et on la mélange avec un large excès de sul-

fate ferrique (25 à 30 grammes). Le tout est introduit avec de l'eau dans un ballon qu'on plonge dans de l'eau bouillante. Un courant d'acide carbonique traverse le mélange pendant toute la durée de l'opération. L'attaque commence vers 100° et s'effectue très rapidement, car au bout de 10 minutes tout l'aluminium a disparu et il ne reste plus qu'une solution brune et transparente. On introduit 20 centimètres cubes d'acide sulfurique et ensuite de l'eau. On laisse refroidir la liqueur dans le courant de gaz carbonique et, sur une portion connue de la solution, on effectue le dosage du sel ferreux à l'aide d'une solution de permanganate à 3^{gr},14 par litre; 1 centimètre cube de cette solution équivaut à 0^{gr},000 895 d'aluminium, à 0^{gr},000 0997 d'hydrogène et à 0^{gr},003 55 de fer.

M. Clennell⁽¹⁾ recommande, pour l'analyse de la poudre d'aluminium, la méthode suivante :

Un gramme de l'échantillon à analyser est séché à 100° jusqu'à poids constant; on a ainsi l'humidité. La substance sèche est ensuite transvasée dans un bécher bien sec de 200 centimètres cubes et lavée avec de l'éther jusqu'à complète élimination de la matière grasse. Les liquides étherés, après filtration, sont évaporés dans un vase taré, et la matière grasse est pesée; le résidu, après extraction par l'éther, est dissous dans de l'acide chlorhydrique dilué et chaud; la solution chaude ainsi obtenue est filtrée sur le filtre qui a servi à filtrer l'éther, et ce filtre est ensuite lavé à l'eau chaude; le résidu insoluble provenant de ce dernier traitement est traité par de l'acide nitrique. La solution est filtrée sur le même filtre que précédemment qu'on calcine ensuite; on obtient ainsi la silice mélangée d'un peu de carbone, qui résiste énergiquement au grillage; on fond avec un peu de peroxyde de sodium, et la silice est séparée avec la méthode habituelle. Le filtrat nitrique est évaporé avec de l'acide sulfurique et ajouté au filtrat chlorhydrique; celui-ci est précipité par de l'acide sulfhydrique, et le précipité obtenu après séparation du liquide est mis à digérer avec de l'acide chlorhydrique chaud à 50 % pour séparer le cuivre et le plomb. L'insoluble, constitué par du sulfure de cuivre, est dissous dans de l'acide nitrique, et le cuivre est titré au moyen du

(1) J.-E. CLENNELL, *Annales de chimie analytique*, 15 décembre 1917, p. 248.

cyanure de potassium. La liqueur contenant le plomb, neutralisée par l'ammoniaque, acidifiée à l'aide de l'acide acétique, est précipitée avec un chromate alcalin; le filtrat dans lequel a eu lieu la précipitation par l'acide sulfhydrique est oxydé et traité par un excès de soude caustique; le précipité formé est dissous et reprécipité par l'ammoniaque. Le nouveau précipité est constitué par de l'oxyde de fer, et, après filtration, la liqueur contient le magnésium.

Le filtrat alcalin contient l'aluminium et le zinc; on le précipite par le sulfure de sodium et le sulfure de zinc obtenu est dosé avec l'iode N/10 et l'hyposulfite de soude. L'aluminium peut être grossièrement déterminé en acidifiant ce dernier filtrat et en chassant l'acide sulfhydrique par une ébullition prolongée, amenant le volume du liquide à 500 centimètres cubes, et prenant 100 centimètres cubes de cette solution qu'on titre avec la soude normale, en employant d'abord comme indicateur le méthylorange et ensuite la phénolphthaléine. La différence entre les deux indicateurs représente l'aluminium. La solution alcaline pour ce dosage est titrée comparativement avec de l'aluminium pur.

Moyen de distinguer l'aluminium pur de ses alliages. — Nicolardot a indiqué le procédé suivant pour distinguer rapidement l'aluminium pur de ses alliages :

On nettoie le métal avec un abrasif, puis on badigeonne aussitôt la surface mise à nu avec une solution contenant 1 gramme de chlorure ou de cyanure mercurique par litre d'eau. Sur le métal pur, on constate une poussée rapide de petits filaments blancs d'alumine, tandis qu'un alliage contenant par exemple 3 % seulement de cuivre demeure absolument inaltéré.

IV. — Influence des traitements sur les propriétés de l'aluminium au point de vue de ses emplois.

Altérabilité. — La question de l'altération lente ou spontanée de l'aluminium a fait l'objet de nombreuses études et notamment de la part de Moissan, Ditle, H. Le Chatelier, Ducru, Heyn et Bauer.

L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

On admet que, si l'aluminium paraît inaltérable à l'air, il doit sa propriété à la facilité qu'il a de s'oxyder superficiellement en recouvrant d'une couche mince et imperméable d'alumine. Au contact de l'eau, il ne subit pas d'altération sensible tant que cette couche subsiste. « Mais toutes les fois, dit-il, que l'aluminium se trouve *à la fois* en contact avec l'atmosphère, l'eau salée, l'eau de mer ou l'eau saumâtre, le métal attaqué se recouvrira d'une couche plus ou moins compacte d'alumine, mélangée d'autres sels solubles ou non. Si l'aluminium, une fois retiré du liquide, n'est pas entièrement débarrassé de cet enduit, s'il n'a pas subi des lavages convenables le dépouillant de toute trace de matière alcaline, son altération continuera à se faire. Partout où la surface extérieure du métal aura laissé pénétrer une trace de sel marin, l'attaque continuera lentement, se faisant d'autant mieux que la matière oxydée est plus hygrométrique et rendra plus facile la réalisation des réactions chimiques possibles. »

En outre, il paraît démontré (H. Le Chatelier, Ducru, Heyn et autres) que les altérations des objets en aluminium ne consistent généralement en une oxydation ou une attaque chimique ou électrolytique du métal, mais surtout en une désagrégation mécanique causée par la séparation des fibres qui conservent individuellement leur ductilité métallique; cette dernière constatation est importante. Les accidents de ce genre ne se manifestent guère que sur les alliages d'alliage ayant été fortement écrouis; ils sont comparables à ceux constatés depuis longtemps sur le laiton trop fortement écroui.

Influence de l'écrouissage : corrosion et désagrégation de l'aluminium. — L'influence de l'écrouissage a été étudiée sur des échantillons de campement militaire, sur des tôles et des disques servant à la confection d'objets courants en aluminium. Les tôles présentent de grandes différences comme résistance chimique; ces différences ne tiennent pas à un écart essentiel de composition chimique, mais au degré de l'écrouissage. Les efflorescences et les altérations constatées sont, les unes réparties irrégulièrement, les autres disposées suivant une direction déterminée, rectiligne sur le métal (fig. 17) ou infléchies en courbes sur les parois des récipients

(fig. 18). Cela démontre clairement que ces défauts tiennent au sens du laminage de la tôle primitive.

Heyn et Bauer, pour se rendre compte exactement de l'influence simultanée des traitements mécaniques et des actions extérieures (air atmosphérique, eau, etc.), se sont servis de plaques d'aluminium. Pour mesurer l'influence des *agents atmosphériques*, les plaques étaient placées sur le toit d'un bâtiment et protégées de la pluie et de la neige par une cloche en verre. Après plus de 200 jours d'exposition, elles ne présentèrent aucun changement d'aspect.



FIG. 17. — Corrosions disposées rectilignement sur le fond d'un récipient en aluminium.

L'influence de l'eau fut étudiée en plongeant les plaques, les unes dans de l'eau distillée, les autres dans l'eau des conduites; celle dernière renfermait par litre 12 milligrammes de silice, 96 de chaux, 12 de magnésie, 71 d'acide carbonique, 34 d'acide sulfurique et 26 de chlore. Au bout de 207 jours, le dépôt blanchâtre formé sur l'aluminium fut enlevé avec une brosse dure et le reste dissous avec de l'acide sulfurique étendu par l'eau distillée et avec de l'acide nitrique pour l'eau des conduites; dans les deux cas, les acides étaient additionnés de bichromate de potasse. Ces mélanges, qui n'attaquent pas sensiblement l'aluminium, donnent les résultats suivants :

L'aluminium est attaqué uniformément par l'eau distillée, les tôles dures étant les moins atteintes ; le dépôt produit est de l'alumine hydratée à peu près pure. Il est fortement attaqué par l'eau des conduites. L'attaque, assez locale, dépend essentiellement du traitement préalable de l'aluminium : elle est *maximum* avec les tôles dures ou écrouies (*fig. 21, A*), *minimum* avec les tôles douces ou recuites (*fig. 21, B*).

L'action alternée de l'air et de l'eau des conduites (cas de la pratique courante) produit une attaque locale et moins forte qu'avec l'eau seule.

On a constaté aussi que l'attaque augmente avec la *température* de l'eau et la présence de l'*acide carbonique*, qui exerce une action dissolvante : l'attaque est uniforme et d'autant plus forte que la tôle a subi plus fortement l'écrouissage. Les *solutions salines* (sulfate de calcium, mélange de sulfate de calcium, de carbonate de calcium, de chlorure de calcium et de silice) agissent d'autant plus fortement qu'elles sont plus concentrées.



FIG. 18. — Corrosions disposées en courbes sur les parois latérales d'un récipient en aluminium.

Il y a donc deux sortes d'attaques : l'une régulière et se manifestant sur toute la surface du métal avec formation d'alumine hydratée ; l'autre se manifestant par des corrosions locales, boursoffures et exfoliations causant une détérioration profonde du métal. Il se produit l'une ou l'autre suivant :

1^o *L'état moléculaire de l'aluminium* : les corrosions sont dues à l'écrouissage et ne se manifestent pas après recuit ;

CORROSION DE L'ALUMINIUM

(ATTAQUES AU CHLORURE DE SODIUM PAR VOIE ÉLECTROLYTIQUE)

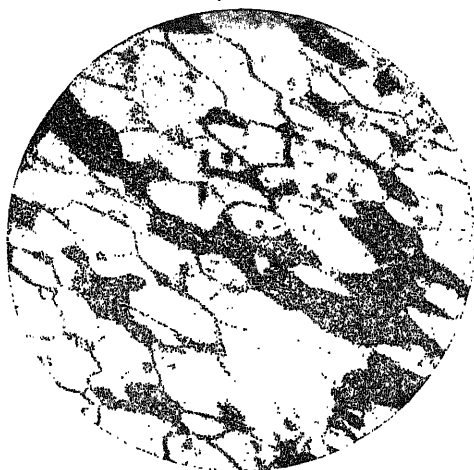


FIG. 19. — Aluminium altérable, spontanément désagrégé.
(Gross. : 200 diam.)

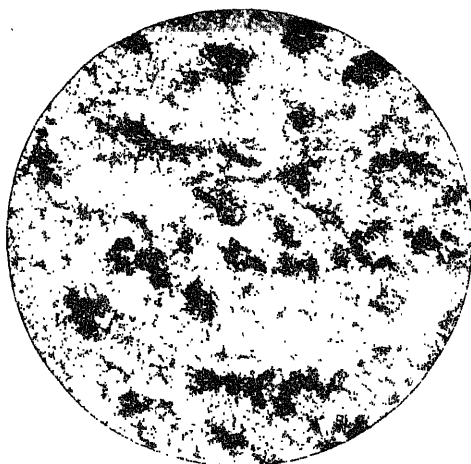
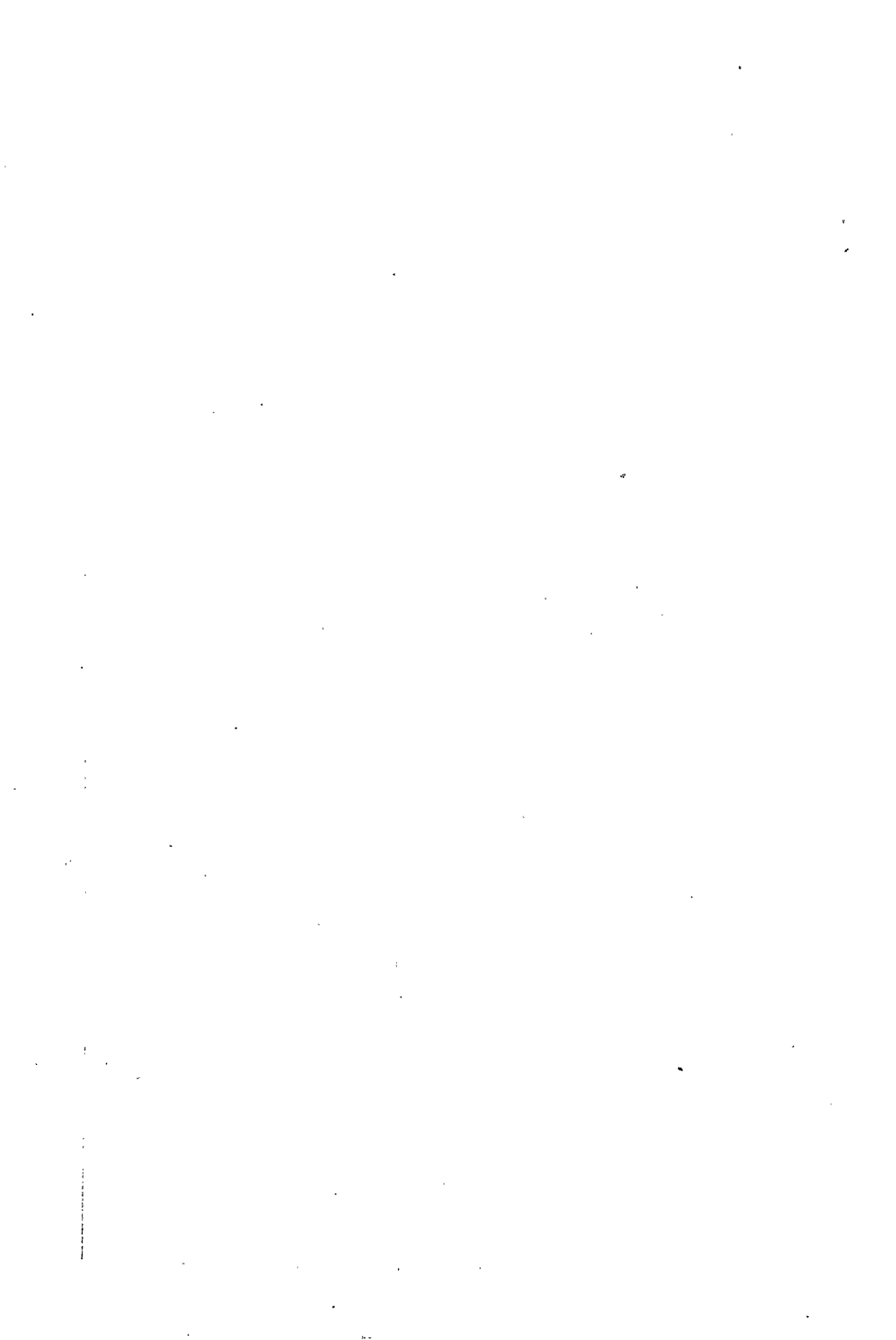


FIG. 20. — Aluminium sain, non altéré.
(Gross. : 200 diam.)



2° *La nature de l'eau ou de la solution saline* (eau des conduites, sels de chaux); en fait, les efflorescences constatées contiennent toujours un peu de chaux et des traces de silice. Le contact des eaux calcaires naturelles favoriserait donc la désagrégation de l'aluminium écoré.

L'intervention des réactions chimiques, sans être tout à fait nulle, n'est en général qu'un excitant dont le principal rôle est de faciliter une transformation du métal écoré. On pourrait donc utilement recuire les ustensiles à 450° par exemple, ou tout au moins les écorer le moins possible pour réduire ces inconvénients au minimum.

La *composition chimique* de l'aluminium ne semble pas avoir une influence bien sensible comparativement à celle produite par l'écoré.

Les *variations de température*, comme celles qui résultent de l'usage d'objets allant sur le feu ou recevant des liquides chauds, combinées aux effets mécaniques et chimiques, peuvent expliquer le mécanisme de la désagrégation *spontanée* de certains échantillons d'aluminium : par ces diverses actions réunies, les joints des cellules s'ouvrent et isolent des grains métalliques; au bout d'un certain temps, le métal, primitivement compact, se transforme ainsi en une masse pulvérulente.

Il est assez facile de caractériser à ce point de vue un aluminium

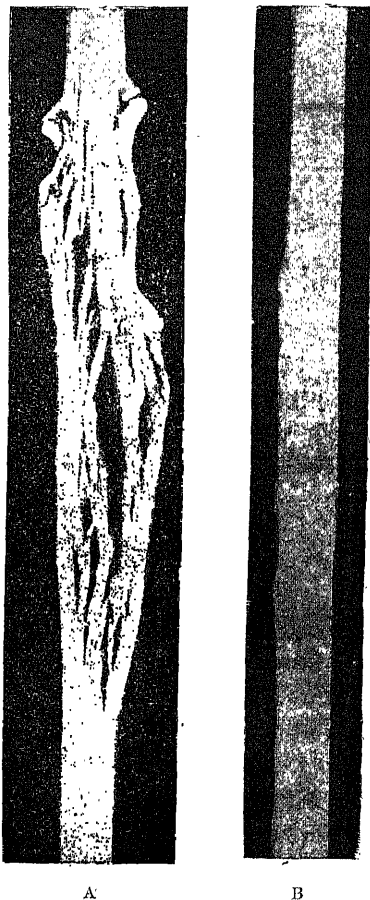


FIG. 21. — Altérabilité de l'aluminium.

A, aluminium écoré : altération maximum. — B, aluminium recuit : altération minimum.

altérable et un aluminium *sain*. La figure 19 montre, d'après H. Le Chatelier, au grossissement de 200 diamètres, une coupe d'un fond de gamelle spontanément désagrégé après un temps de service très court. On l'a soumise pendant quelques minutes à l'action d'un courant de 10 milliampères par centimètre carré dans une solution de chlorure de sodium; l'échantillon étudié servait d'anode. On voit un réseau cellulaire très net et, en outre, des trous noirs polygonaux résultant de l'arrachement de quelques cellules. Le métal n'a pas été dissous par le réactif, mais des fragments métalliques ont été enlevés; ils nagent en effet dans le liquide sous forme de paillettes brillantes. La figure 20 montre, au même grossissement, un échantillon d'aluminium non altéré, soumis à la même attaque électrolytique. On constate la présence de taches noires irrégulières correspondant aux points où le métal a été chimiquement dissous, mais on n'observe nulle part d'arrachement de parcelles métalliques; on ne voit pas non plus de réseau à aspect cristallin.

Ces constatations expliquent la cause et le mécanisme de la désagrégation de certains échantillons d'aluminium dans lesquels on voit surtout l'effet d'une action mécanique première.

Inflammabilité des poussières d'aluminium. — On sait que les poussières peuvent, dans certaines circonstances, provoquer des incendies et même des explosions subites. En ce qui concerne l'aluminium, ces dernières se produisent sous des influences diverses.

Dans la fabrication de la poudre d'aluminium (v. p. 102), on les attribue généralement à la chaleur dégagée par le frottement des balais lors de leur traitement final. On a en outre observé que la poudre pure n'explose pas par l'action des étincelles électriques; mais, si elle se trouve mêlée à un gaz inflammable, la conflagration se produit. On est ainsi arrivé à cette déduction que le danger d'explosion de la poussière d'aluminium était augmenté par la présence, au sein de celle-ci, du carbure de ce métal (v. p. 254) qui, en présence de l'humidité, donne naissance à du méthane.

Pour supprimer ces accidents, il convient donc d'utiliser de l'aluminium aussi pur que possible et, en outre, de ne manipuler en grand la poudre d'aluminium que dans des pièces de construction appropriée ou même en plein air.

Fusion de l'aluminium. — L'aluminium peut être fondu dans des creusets ordinaires en plombagine sur un feu de coke ; mais pour de grandes quantités, on emploie généralement un four à réverbère chauffé à la houille. Afin d'éviter la combustion, le métal ne doit pas être porté au delà de 725° , car à cette température l'aluminium s'oxyde facilement au contact de l'air. L'alumine qui en résulte a pour résultat de former autour de l'aluminium fondu une sorte de protecteur.

On se rend bien compte de ce fait en chauffant un fil d'aluminium dans la flamme d'un bec de gaz : la surface du fil se transforme en alumine, laquelle forme une poche cylindrique continue dans laquelle l'aluminium fondu se trouve séparé de l'oxygène de l'air et la combustion du fil ne se produit pas (Malignon). La résistance de cette enveloppe est suffisante pour supporter le métal fondu, qui ne coule pas si le diamètre du fil n'est pas trop grand. En apparence, l'aluminium semble ainsi avoir un retard à la fusion qui n'est dû, en réalité, qu'à la présence de l'alumine superficielle.

L'aluminium peut être coulé dans des moules en sable, ou en coquille. Ce dernier procédé est généralement employé pour les petits moulages unis lorsqu'on veut obtenir un travail très soigné. Les moulages obtenus à l'aide de moules en acier poli présentent une surface parfaitement lisse.

Les moules en sable conduisent lentement la chaleur et les lingots obtenus sont plus ou moins cristallins. Il y a intérêt à enlever rapidement la chaleur au métal en fusion pour le rendre plus homogène. Les moules au carborundum remplissent ce but ; ils sont constitués par un mélange de ce corps finement pulvérulent ($4^{\text{kg}}, 5$), une faible quantité de sucre ($0^{\text{kg}}, 35$) et d'argile ($0^{\text{kg}}, 28$) ; on en forme une masse plastique à laquelle on donne la forme des moules et qu'on cuit ensuite.

L'aluminium destiné à être laminé est moulé en grands saumons ou lingots, qui sont ensuite laminés à chaud.

Pratiquement, pour la bonne conduite de la fusion, on jette d'abord quelques morceaux d'aluminium dans le creuset ; aussitôt qu'ils commencent à fondre, on en ajoute d'autres jusqu'à ce que le creuset contienne la quantité dont on a besoin. On brasse avec l'écu-moire et, dès que le métal fondu est assez chaud pour ne plus

adhérer au fer, on retire le creuset du feu, on brasse à nouveau, on écume et on coule.

Les outils avec lesquels on brasse l'aluminium ne doivent jamais atteindre la chaleur du rouge : à cette température, en effet, il y aurait incorporation de fer dans l'aluminium. Si, au cours de l'opération, un ringard venait à être porté au rouge, il faudrait le laisser refroidir et se servir d'un ringard plus froid.

M. Billon-Daguerre utilise la *fusion dans le vide* pour supprimer les gaz occlus dans l'aluminium, lorsque celui-ci est destiné à être employé pur, dans la fabrication des cathodes de tubes à vide (lampes à vapeurs métalliques), par exemple. On se sert, pour cette fusion, d'un tube de quartz ayant la forme représentée par la figure 22. On y introduit de la grenaille d'aluminium A; on fait le

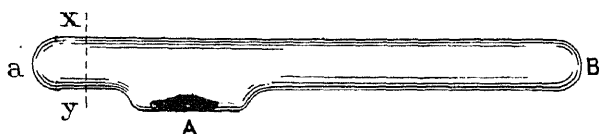


FIG. 22. — Tube de quartz pour la fusion et la purification de l'aluminium dans le vide.

vide pendant qu'on chauffe à la fusion; on scelle ensuite en B et on laisse refroidir en tenant le tube verticalement. On brise celui-ci en *xy*, ce qui permet de recueillir en *a* un culot qu'il suffit de scier, couper et polir pour le rendre utilisable immédiatement. L'aluminium ainsi obtenu perd toute sa porosité; la présence de gaz occlus, qui nuisent à son emploi comme cathode, est ainsi évitée.

Entretien de l'aluminium. — Nettoyage. — Il s'effectue aisément en lavant l'intérieur des objets à l'eau chaude et au savon. Pour l'extérieur, on se sert d'une poudre à polir. Les ustensiles ayant été en plein feu peuvent être nettoyés à la brique pilée finement. Il faut avoir soin de ne pas employer de carbonates de soude ou de potasse qui rongent le métal.

On emploie aussi le mélange suivant :

Oléine commerciale.....	10 parties
Carbonate d'ammoniaque.....	1 —
Chaux de Vienne.....	1 —

de même que celui-ci :

Tripoli.....	60 parties
Terre à foulon.....	10 —
Acide stéarique.....	10 —

Ces pâtes peuvent être préparées d'avance ; le mélange doit être très homogène.

Polissage. — Il s'effectue à l'aide d'une poudre ou d'une pâte abrasive très fine (sanguine) en utilisant une peau de mouton garnie de sa laine ou d'une peau de chamois. On peut encore, pour obtenir un blanc éclatant, imbiber le produit polissant d'une émulsion préparée en agitant fortement parties égales de rhum et d'huile d'olive.

Le polissage proprement dit se fait à l'aide de sanguine et d'un brunissoir ; comme lubrifiant on emploie, soit le pétrole, soit une mixture composée de deux cuillerées à bouche de borax dissous dans un litre d'eau chaude à laquelle on ajoute quelques gouttes d'ammoniaque.

Matage. — Le matage des objets en aluminium s'effectue à l'aide d'une solution chaude à 10 % de bicarbonate de soude saturée de sel marin. Les pièces sont trempées dans cette solution pendant quinze à vingt secondes, retirées et brossées, puis trempées à nouveau pendant un instant pour être ensuite soigneusement rincées à l'eau courante et enfin séchées dans la sciure de bois. La couleur obtenue par ce traitement est celle de l'argent mat ; elle est due à une très légère attaque du métal en même temps qu'à un très minime dépolissage de sa surface.

Enduits protecteurs. — On ne peut songer à eux pour les ustensiles en service, mais, pour la conservation des objets en aluminium, on peut utiliser avec profit la vaseline. De nombreux essais ont démontré que l'attaque desdits objets par l'eau ordinaire était à peu près nulle tant au point de vue de la corrosion que de l'attaque générale.

Neuhardt a en outre indiqué le mode de préparation d'un vernis qui protège efficacement l'aluminium. On opère comme suit :

On fait dissoudre, de préférence dans un vase émaillé, 100 parties en poids de gomme laque dans 300 parties d'ammoniaque. On chauffe au bain-marie pendant une heure environ et on laisse refroidir, après quoi le vernis est prêt à être employé. L'aluminium que l'on veut recouvrir de ce vernis est soigneusement décapé par de la potasse faible; on le laisse sécher dans un endroit chaud après l'avoir lavé à l'eau tiède et, après avoir enduit sa surface avec le vernis, on le chauffe un quart d'heure à 250° environ dans un four. Ce vernis protecteur, qui est incolore, permet ensuite de peindre ou de recouvrir la surface des objets d'un produit quelconque sans aucune crainte d'effritement.

Écriture sur aluminium. — Pour écrire sur des feuilles ou plaques d'aluminium (étiquettes de jardin notamment), il faut utiliser, non de l'encre ordinaire, mais de l'encre d'imprimerie; on la dilue dans de la benzine ou de l'alcool afin de rendre l'écriture indélébile et, après avoir écrit, on chauffe le métal au rouge sombre et on le laisse ensuite refroidir. Ce procédé convient très bien à toutes les inscriptions devant rester en pleine air ou être exposées à l'action des intempéries.

CHAPITRE III

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ALUMINIUM

I. — Applications métallurgiques.

Affinage des fontes et des aciers. — L'aluminium possédant d'énergiques propriétés réductrices peut servir utilement à l'affinage des fontes et des aciers. Ajouté en faible proportion à l'acier ou au bronze, au moment de la coulée il se comporte comme un agent dont l'effet est comparable à celui du silicium ; il réduit les oxydes existant dans le métal, rend celui-ci plus ductile et évite la formation des soufflures.

Introduit dans la fonte liquide, il déplace son carbone sous forme de graphite et lui donne un grain serré et plus homogène. C'est ainsi qu'une fonte ayant la composition suivante :

Carbone total.....	3,67 0/0
Carbone graphitique.....	0,40
Silicium.....	0,48
Manganèse	0,11

donne, après addition d'aluminium, les résultats ci-après :

Pour 1 0/0 d'aluminium..	3,48 0/0 de carbone graphitique.
— 4 — ..	2,05 — —
— 12 — ..	0,16 — —

Ces chiffres semblent montrer que le pourcentage de graphite dépend de la teneur en aluminium et que, pour 1 0/0 de ce corps, presque tout le carbone est à l'état de graphite.

La chaleur dégagée par l'oxydation de l'aluminium au contact des oxydes contenus dans les fontes et aciers est suffisante pour porter la masse métallique à 1.400° environ. Cette chaleur d'oxydation est contenue tout entière dans le bain, ce qui provoque une émulsion rapide de toute la masse. L'alumine, insoluble dans le bain, passe dans les scories et surnage.

C'est généralement sous forme d'aluminium pur, plus qu'à l'état d'alliage ferreux, qu'on utilise ce métal en sidérurgie. On jette un petit fragment d'aluminium au fond de la poche et on coule quelques gouttes de fonte qui l'emprisonnent et lui fournissent la chaleur nécessaire lui permettant d'entrer en fusion. Dès que la fonte est versée dans la poche, on remarque un bouillonnement intense accompagné d'un grand développement de chaleur, et la fonte prend un aspect presque transparent. On évite la réoxydation en recouvrant la fonte de sable ou de charbon. Pour que la réaction se produise dans de bonnes conditions, la fonte doit être à une température suffisante; sans cette précaution, elle serait à peu près nulle.

Pour les pièces massives, il faut avoir soin d'attendre que la réaction soit terminée pour ne pas s'exposer à avoir des dépôts d'alumine à la partie supérieure des pièces coulées. Pour les pièces minces, il faut couler rapidement afin d'éviter les refus dans les parties délicates et celles éloignées de la coulée.

Pour les aciers, la proportion d'aluminium à ajouter varie suivant leur qualité et leur emploi. Pour ceux à 0,5 % de carbone, on ajoute de 160 à 320 grammes d'aluminium par tonne; pour ceux à plus de 0,5 %, on n'ajoute que 150 à 200 grammes de métal.

Nous avons dit que la présence de l'aluminium en petite quantité supprime les *soufflures*. Ces dernières sont dues au dégagement partiel, au moment où le métal se refroidit, des gaz absorbés pendant la fusion; or l'aluminium possède la propriété de réagir chimiquement ou de se combiner avec la plupart de ces gaz.

Les fonderies de fer et d'acier qui emploient dans ce but l'aluminium sous forme de *ferro-aluminium* utilisent celui à 90 % de fer et 10 % d'aluminium. Cet alliage, très cassant, peut être ainsi utilisé facilement avec la quantité nécessaire, au moment même de la coulée. Plusieurs métallurgistes emploient l'*aluminium granulé*, la

grosseur des grains pouvant varier entre celle d'un grain de riz et celle du sable.

Les producteurs d'aluminium livrent aussi de petits blocs d'aluminium ayant des poids fixes, ce qui évite aux industriels d'avoir à peser le métal au moment de son emploi ; cela permet d'ajouter telle quantité déterminée d'aluminium à la fonte ou à l'acier avec le minimum de pertes et de difficultés.

On emploie annuellement environ 2.000 tonnes d'aluminium, dans le monde, comme réducteur, dans la fabrication des fontes et des aciers.

La *thermite* (v. p. 83) sert au même usage.

Ferro-aluminium et aciers à l'aluminium. — Les premiers alliages industriels de fer et d'aluminium sont dus aux frères Cowles qui les obtinrent par réduction électrothermique de l'alumine par le carbone en présence du fer.

On chargeait le fer avec une certaine quantité de fer, puis on abaissait l'anode et on faisait passer le courant. La fusion du métal se produisait rapidement ; on introduisait alors alternativement de petites charges de fer et d'alumine jusqu'à ce que le creuset fût rempli. On obtenait ainsi des ferro-aluminums de composition variable.

Actuellement, les alliages de fer et d'aluminium sont peu employés : on leur pré-

fère généralement l'aluminium. Ils se préparent au four électrique, soit par la réduction de l'alumine en présence de fer, soit par addition d'aluminium dans un bain de fer fondu. Dans ce dernier cas, on obtient facilement des alliages renfermant 10 % d'aluminium ;



FIG. 23. — Ferro-aluminium montrant la présence du constituant FeAl_3 . — Gross. : 30 diam. Polissage en bas-relief (d'après L. Guillet).

c'est du reste cet alliage qui est le plus employé bien qu'on en prépare aussi à 20 % d'aluminium. On connaît les combinaisons définies Fe^3Al^2 , FeAl^2 , FeAl^3 (fig. 23 et 24) et Fe^2Al^3 .

Dès que la proportion d'aluminium atteint 6 % environ, l'alliage devient fragile ; à 7 %, sa structure est cristalline. Jusqu'à 20 % d'aluminium, les alliages sont magnétiques, mais non au-dessus de ce pourcentage. C'est pourquoi on fabrique, depuis quelques années, des aciers renfermant des quantités assez importantes d'aluminium

et qui trouvent des débouchés dans les constructions électriques (tôles de dynamos) en raison de leur faible hystérésis magnétique.

L'aluminium semble avoir peu d'influence sur les propriétés mécaniques des aciers tant que son pourcentage ne dépasse pas 3 %. A 3 % d'aluminium, il y a une diminution sensible dans les allongements et la striction. A 5 %, on note une légère augmentation dans la charge de rupture. A 7 %, les aciers sont fragiles. L'acier à 15 % d'alu-

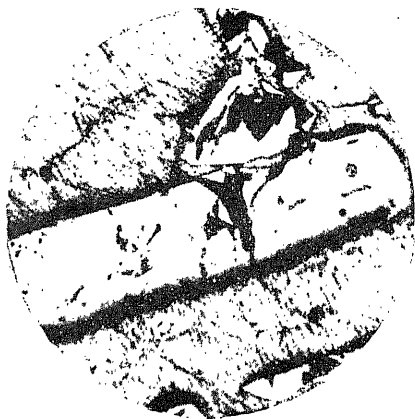


FIG. 24. — Constituant FeAl^3 . Même échantillon que celui de la figure 23, mais grossi à 100 diamètres.

minium, qui présente une microstructure spéciale, possède une charge de rupture élevée.

D'après L. Guillet, dans les aciers à l'aluminium ce métal entre en solution dans le fer et cette solution empêche la perlite de se développer, la forçant à prendre une forme granulaire. Pour des teneurs très faibles d'aluminium (fig. 25), on a de la perlite et de la ferrite ; quand la teneur en aluminium est assez élevée, la perlite devient plus compacte, puis ne peut plus se former du tout et on a alors de la cémentite. Il ne se produit pas de graphite, comme on pourrait le croire d'après la constatation faite que l'aluminium précipite le carbone dans les fontes sous cette forme, comme nous l'avons vu plus haut (p. 73).

Aluminothermie. — La quantité de chaleur dégagée par l'aluminium brûlant à l'état de métal en présence d'un oxyde étant considérable, on conçoit qu'il puisse être utilisé pratiquement pour la réduction d'un grand nombre d'oxydes réfractaires. C'est ce qui a bien lieu en effet et on a donné le nom d'*aluminothermie* aux opérations qui ont précisément pour but d'utiliser la température élevée produite par la combustion de l'aluminium en présence de l'oxygène. Ces opérations concernent notamment la préparation, au laboratoire ou dans l'industrie, des *métaux réfractaires* (chrome, manganèse, vanadium), des ferro-alliages, des alliages d'aluminium, la soudure des rails, des tubes et profilés. Elles prennent une importance pratique chaque jour plus considérable.

Plusieurs opérations sont néanmoins nécessaires pour la production des métaux ou des alliages par ce procédé. Ce sont : la *préparation du mélange* d'alumi-

nium avec le ou les oxydes à réduire ou à allier avec l'aluminium ; la préparation de la *poudre d'allumage* destinée à amorcer la réaction ; la préparation du *creuset* ou four de réaction ; l'opération proprement dite.

Dans la préparation du mélange, il faut employer des matières parfaitement desséchées et éviter la présence de corps volatils ou décomposables à la température élevée de la réaction. L'aluminium doit être aussi pur que possible ; on l'emploie à l'état de poudre, de grains ou de copeaux.

La poudre d'allumage est généralement composée d'un mélange de bioxyde de baryum et d'aluminium en poudre dans lequel on fixe un ruban de magnésium destiné à enflammer le tout.

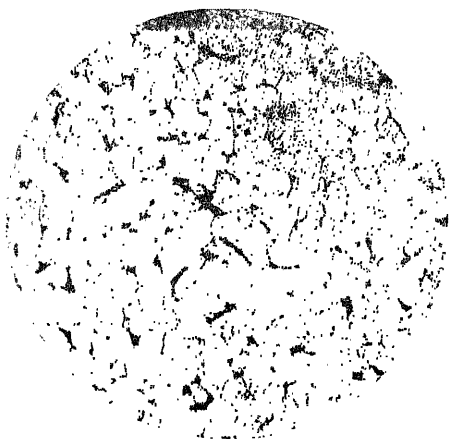
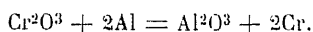


FIG. 23. — Acier à l'aluminium à 0,085 % de carbone et 0,5 % d'aluminium : perlite et ferrite. — Attaque à l'acide picrique. (Gross.: 200 diam.)

Le creuset peut être en terre ou en plombagine; on le garnit intérieurement de magnésie pour éviter l'action des matières en fusion sur le carbone et le silicium renfermés dans ce creuset. La magnésie doit être fortement calcinée avant son application, en partie à basse température, en partie à haute température, afin d'éviter des retraits et des fendillements au séchage.

L'opération est très simple et rapide. Le creuset étant bien séché, on y place une petite quantité du mélange préparé préalablement, puis on verse au centre de la surface supérieure quelques grammes de la poudre d'allumage et on enflamme cette dernière. Il se produit une légère explosion; le mélange d'aluminium et de bioxyde de baryum entre en réaction et communique le feu à toute la masse qui entre rapidement en fusion. Dès que le bain apparaît nettement liquide, on ajoute le mélange d'aluminium et de ou des oxydes à réduire, jusqu'à ce qu'on ait dépensé toute la matière préparée. On laisse ensuite refroidir et, au bout de quelque temps, on brise le creuset. Si l'opération a été bien conduite, on trouve une matière qui se sépare aisément en deux parties: un culot, constitué par le métal ou l'alliage formé aux dépens de l'oxyde, et, à partie supérieure, de l'alumine dure genre de corindon artificiel auquel on a donné le nom de « corubis ».

Préparation des métaux et alliages. — Dans le cas du chrome, la réaction est la suivante :



La température produite varie entre 2.500° et 3.000°. Le métal obtenu est très pur, le procédé très rapide; mais, malgré les nombreux perfectionnements dont il a été l'objet, il est toujours assez coûteux. Cependant, il a été appliqué industriellement à la préparation de plusieurs alliages importants tels que le ferro-chrome, le ferro-titane, le ferro-molybdène, le ferro-tungstène, le ferro-vanadium. On l'a combiné aussi avec l'emploi du four électrique, notamment pour la préparation de certains métaux très réfractaires, tels que le vanadium, le tungstène et le molybdène.

L'appareil le plus généralement employé pour l'application de

la méthode aluminothermique est celui représenté par la figure 26 qui permet d'obtenir des alliages très purs. Il se compose essentiellement d'un grand creuset *a*, en terre réfractaire ou en plombagine, garni intérieurement d'une brasque en magnésie; l'épaisseur de cette dernière va en augmentant des bords au fond du creuset et celui-ci est disposé sur une couche de charbon contenue dans une enveloppe en briques réfractaires. Pour combler l'espace, on ajoute de petits morceaux de coke qui forment une sorte d'enveloppe isolant le creuset de l'extérieur et le protégeant ainsi contre les courants d'air possibles qui pourraient le briser.

Au-dessus du creuset est une trémie ou entonnoir de chargement *c* destiné à introduire dans le creuset le mélange à réduire; une chaîne *m* permet cette manipulation. L'évacuation des fumées dégagées au cours de l'opération est assurée à l'aide d'un capuchon *d* aboutissant à une conduite *e* engagée dans une souche de cheminée *f*.

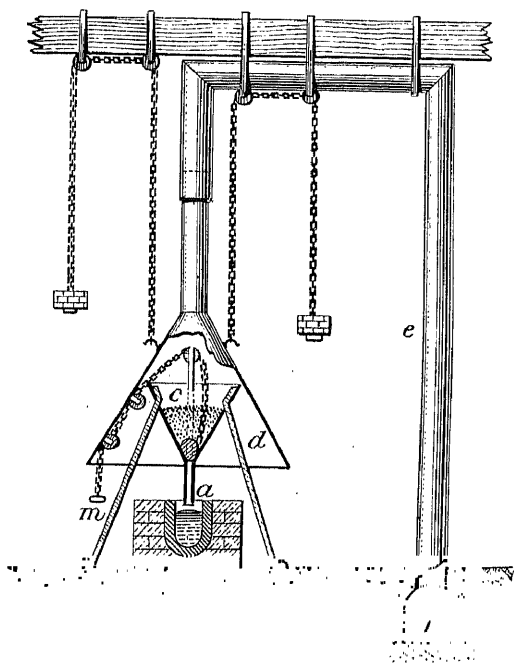
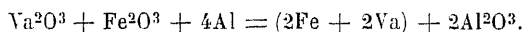


FIG. 26. — Four pour la production industrielle des réactions aluminothermiques.

L'opération est généralement discontinue vu la difficulté d'obtenir des coulées régulières par la base du creuset; mais une fois la réaction terminée (quelques minutes), il est facile de vider le creuset par bascule en retirant, d'une part l'alliage fabriqué et, d'autre part, le laitier.

Dans le cas du *ferro-vanadium*, la réaction est la suivante :



Le produit obtenu est d'une grande pureté, présente un aspect très homogène, un éclat nettement métallique et il peut être utilisé directement en métallurgie.

Comme autres exemples d'applications de l'aluminothermie à la préparation des métaux et ferro-alliages, nous citerons celle concernant le *manganèse*. On obtient ainsi un métal ne contenant aucune trace de carbone et pouvant être préparé par centaines de kilogrammes à l'heure dans des creusets de dimensions relativement restreintes. L'opération peut être rendue continue en disposant dans le creuset deux trous de coulée, l'un pour le métal et l'autre pour la scorie. Une fois la masse convenablement fondue, il suffit, pour obtenir la quantité de métal nécessaire, d'introduire dans le creuset, continuellement et en proportion déterminée, le mélange d'oxyde de manganèse et d'aluminium. Les usines d'Essen, en Allemagne, et de Saint-Michel-de-Maurienne, en France, préparent le manganèse de cette façon.

On peut obtenir du manganèse très pur (à 98,8 % Mn) en mélangeant l'oxyde salin, Mn^3O^4 , à de la poudre d'aluminium dans les proportions suivantes, en poids :

Mn^3O^4	750 parties
Al.....	200 —

Le métal ainsi obtenu ne renferme que des traces de silicium et 1 % environ de fer et d'aluminium. Il est brillant, dur et presque inaltérable à l'air; cette dernière propriété constitue une des principales qualités du manganèse aluminothermique.

Le *chrome* se prépare d'une façon analogue. Les creusets sont à parois très épaisses, de manière à pouvoir résister à la pression et à la chaleur produites au cours de l'opération. Les principales impuretés du métal obtenu sont, comme précédemment, le silicium, le fer et l'aluminium; elles proviennent en majeure partie des matières premières qu'il est difficile d'éliminer complètement du mélange initial à cause des frais que cette préparation entraînerait.

On peut arriver cependant à préparer du chrome très pur en partant, non pas du sesquioxyde Cr_2O_3 , mais d'un mélange composé de ce dernier corps et d'une certaine proportion d'anhydride CrO_3 .

On effectue le mélange dans la proportion suivante :

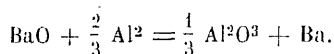
Cr_2O_3	600 parties
CrO_3	60 —
Al	210 —

La réduction s'effectue très rapidement et sans projections.

Pour le *tungstène*, on part de l'acide tungstique, TuO_3 . Dans un creuset surmonté d'une hotte aboutissant à une cheminée comme celui dont il a été précédemment question, on place le mélange ci-dessus et on l'enflamme à l'aide d'un cordon Bickford mis au contact de la cartouche de bioxyde de baryum. On obtient un métal très pur si l'on a pris soin de mettre l'acide tungstique en léger excès; on évite ainsi la formation de l'alliage TuAl^4 , lequel se dissoudrait dans le métal et nuirait à ses applications métallurgiques.

Pour le *molybdène*, on utilise le molybdate de calcium. On obtient un métal très pur, mais son prix de revient, comme du reste celui du tungstène obtenu de la même façon, est assez élevé. Les méthodes électrothermiques sont, à ce titre, préférables et suffisantes pour l'obtention de ces métaux destinés aux opérations sidérurgiques.

M. Guntz a utilisé aussi l'aluminothermie pour la préparation du baryum métallique. Elle s'effectue d'après l'équation :



La réaction est encore facilitée par la volatilité du baryum qu'on recueille par condensation.

Les *ferro-chromes* se préparent à l'aide d'un mélange composé de sesquioxyde de chrome, de sesquioxyde de fer et d'aluminium. La réaction est plus ou moins violente et l'alliage plus ou moins riche suivant les proportions choisies. Mais, pour éviter les frais causés par l'emploi de l'aluminium en poudre, on choisit de l'aluminium en lingots et on associe les deux méthodes aluminothermique et électrothermique.

Dans ce but, on peut utiliser un four à électrode garni intérieurement de briques de magnésie. L'aluminium est d'abord introduit dans le four et, lorsqu'il est entièrement fondu, on ajoute progressivement la charge de minerai (chromite, Cr_2O_3 , FeO), celui-ci étant grossièrement concassé. L'oxyde de fer est alors réduit et le fer se dissout dans l'aluminium; puis c'est le tour de l'oxyde de chrome qui s'allie au fer pour donner du ferro-chrome. Avec une dépense relativement faible, on peut facilement préparer ainsi 300 kilogrammes de ferro-chrome à 75 % en une demi-heure. La réduction de 100 kilogrammes de chromite à 65 % d'oxyde de chrome donne environ 56 kilogrammes de ferro-chrome à 70 % et exige pour cela 32 kilogrammes d'aluminium.

Le *ferro-tungstène* s'obtient en réduisant simultanément l'oxyde de fer et l'oxyde de tungstène. Les alliages obtenus sont d'une extrême pureté et magnétiques. On les emploie avec succès dans la fabrication des aciers à coupe rapide.

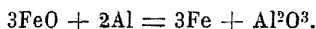
Le *ferro-vanadium* s'obtient d'une façon analogue, comme nous l'avons vu plus haut; il se différencie de l'alliage obtenu par les procédés électrothermiques par ses reflets et son éclat légèrement jaunâtre.

On a du reste combiné les deux méthodes, comme pour la préparation du ferro-chrome, en partant d'un mélange composé d'acide vanadique, de charbon, de fer et d'aluminium. Les deux premières substances sont introduites dans le four électrique avant l'aluminium, et, lorsque la réduction est arrivée à un certain point, on projette dans le bain de l'aluminium en poudre, ce qui achève la réaction. Comme fondant, on peut utiliser un mélange de fluorure de calcium et de chaux, ce qui donne une scorie très fusible. Ce procédé réduit de plus des deux tiers la dépense d'aluminium sans diminuer le pourcentage du vanadium uni au fer dans l'alliage.

Le *ferro-molybdène* peut être obtenu comme les ferros précédents, mais le prix de revient de la réduction limite cette préparation aux essais et recherches de laboratoire. La production, par voie aluminothermique, d'un kilogramme de ferro-molybdène à 80 % exige en effet pratiquement de 420 à 460 grammes d'aluminium représentant par tonne une dépense comprise entre 1.000 et

1.200 francs de ce métal. Au point de vue économique et malgré la pureté des alliages obtenus, cette méthode ne peut donc avantageusement concurrencer les procédés électrothermiques. Ces derniers permettent en effet d'obtenir du ferro-molybdène à 80-85 % de molybdène, ce qui est très suffisant dans la pratique.

Soudure des rails. — A côté de ces applications importantes, l'aluminothermie rend aussi de grands services dans la *soudure rapide des rails*. Le procédé consiste à faire couler de l'acier doux fondu d'un creuset dans des moules en sable placés autour des joints des rails à réunir. Après nettoyage et grattage, ces derniers sont chauffés à la température du rouge, pour que l'acier coulé ne se refroidisse pas à leur contact. Le creuset, supporté par un trépied, est placé directement au-dessus du moule. Après l'avoir chargé, on y ajoute le composé aluminothermique formé d'aluminium et d'oxyde de fer en grains (*thermite*) et l'on provoque la réaction et la fusion. La réaction est la suivante :



La chaleur produite est très intense et libère de l'acier, qui coule immédiatement au fond du creuset et de là dans le moule. En trente secondes, l'opération est terminée et, cinq minutes après, on peut enlever le moule pour le passage des voitures.

On opère généralement de la façon suivante :

Les deux rails à souder A et B (fig. 27 et 28) sont placés bout

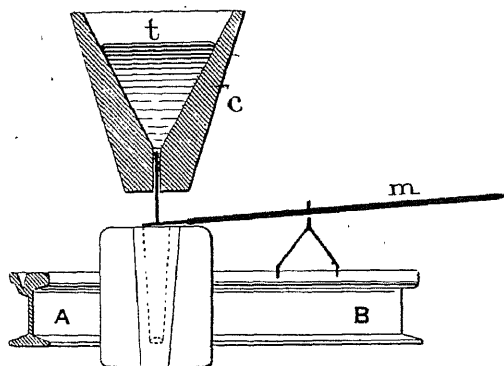


FIG. 27. — Soudure des rails par l'aluminothermie : schéma du dispositif.

à bout ; on peut les serrer l'un contre l'autre au moyen de vis ; vers le joint, à l'endroit où l'on doit couler la thermité, on fait une gar-

niture en terre réfractaire; on place en cet endroit un trépied formé de tiges métalliques sur lequel on met le creuset C qui contient la poudre de thermite. Ce creuset est percé à la base d'un trou que l'on bouche au moyen d'une pointe métallique fixée à l'extrémité d'un levier *m*. On allume la thermite; dès que celle-ci est fondue, on donne un choc sur le levier, de façon à déboucher le creuset; le fer en fusion coule par cette ouverture et vient souder les deux rails. La scorie d'alumine qui s'est formée, étant plus

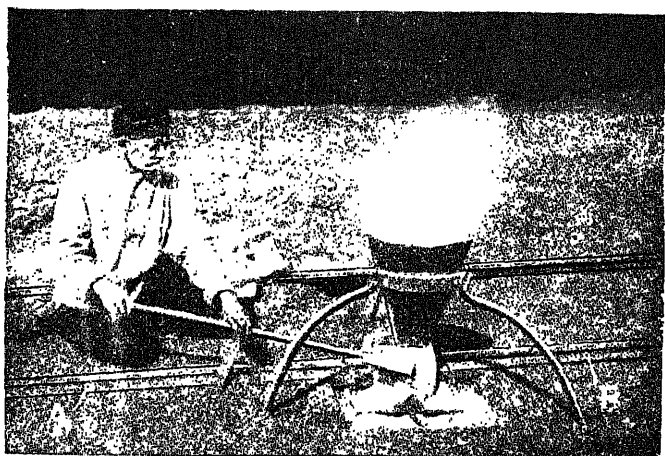


FIG. 28. — Soudure des rails par l'aluminothermie : vue d'ensemble du dispositif en fonctionnement.

légère, surnage sur le bain de fer fondu et tombe en dernier lieu du creuset; lorsque la soudure est finie, cette alumine vient couvrir le métal et empêche qu'il s'oxyde pendant le refroidissement. Le système de vis pour serrer les rails l'un contre l'autre permet de faire pression sur la soudure avant la solidification, ce qui la rend plus solide. Ce procédé de soudure est, comme on le voit, d'une grande simplicité.

De nombreuses Compagnies de tramways emploient ce procédé qui est très satisfaisant et économique par sa rapidité. On l'a du reste généralisé dans ces dernières années (fig. 29 et 30) et on l'emploie en outre à la réparation et à la soudure des tubes, arbres de transmission, roues dentées, au bouchage des trous, etc. Le fer

employé doit être aussi pur que possible, renfermer très peu de phosphore, de soufre et de silicium.

Le mélange de poudre d'aluminium et de bioxyde de baryum,

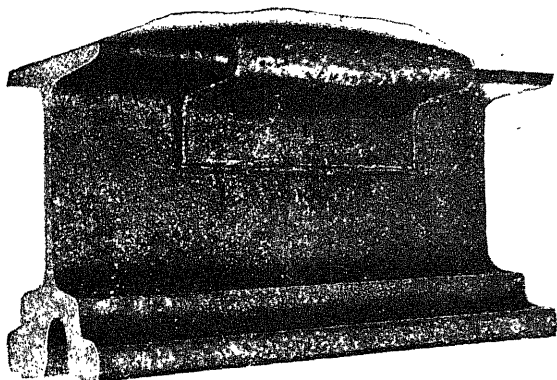


FIG. 29. — Éclissage de patin de rail en fer soudé par l'aluminothermie.

constituant en quelque sorte la cartouche d'allumage, doit être effectué avec beaucoup de précautions à l'aide d'une spatule en bois et non au mortier, afin d'éviter une inflammation subite et dangereuse. D'autre part, on doit le conserver à l'abri de l'humidité si

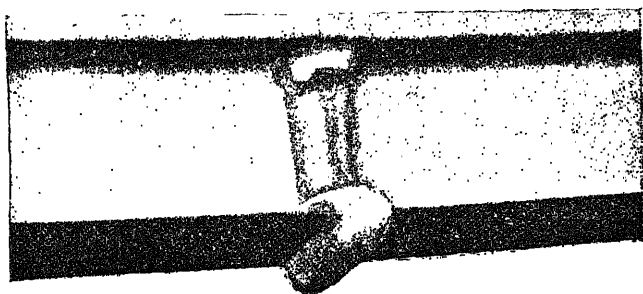


FIG. 30. — Réparation d'un rail par soudure aluminothermique.

on le prépare quelque temps d'avance, pour qu'il puisse s'enflammer au moment de l'emploi.

Chauffage des creusets. — Lorsqu'on se propose d'obtenir une température élevée, dépassant celle de la fusion du platine, en

vue d'étudier certaines réactions, on se sert généralement du four électrique. Les procédés aluminothermiques peuvent être également utilisés. En effet, si l'on veut chauffer rapidement à une température élevée, supérieure à celle de la fusion du platine, un corps quelconque, on n'a qu'à l'enfermer dans un creuset en magnésie placé dans un autre creuset ordinaire en terre, en garnissant l'intervalle des deux creusets avec un mélange d'oxyde de fer et d'aluminium auquel on met le feu par l'un des procédés connus.

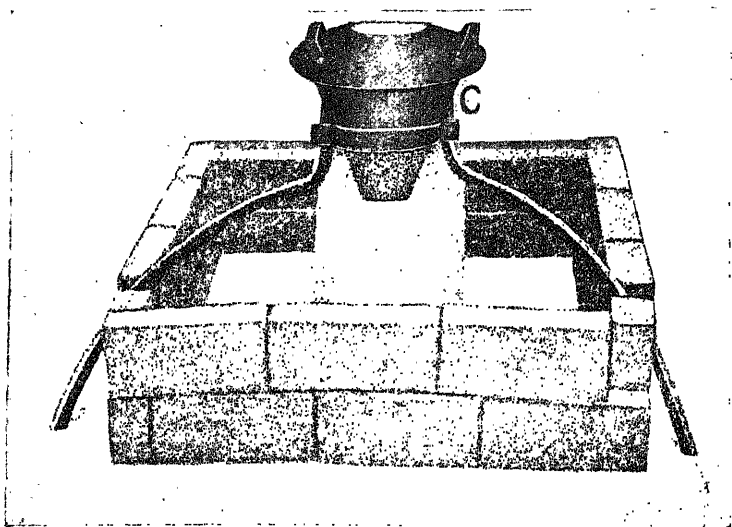


FIG. 31. — Percement d'une plaque d'acier par fusion aluminothermique.

On peut remplacer le petit creuset de magnésie par un tube de même substance traversant le grand creuset au moyen de deux ouvertures qu'on y a ménagées.

C'est donc l'application de l'aluminothermie employée non plus pour préparer des métaux réfractaires mais utilisée, à cause de la haute température qu'elle produit, au chauffage de corps étrangers.

Perforation du fer et de l'acier. — Le fer thermité s'écoulant automatiquement sur une plaque de fer a, pour action de la perforer. Si l'on désire, par exemple, percer une tôle de 20 à 25 mil-

limètres d'épaisseur, on versera dans le creuset automatique C (*fig. 31*) 2^{kg},5 à 3 kilogrammes de thermite. On incline la tôle sous le creuset, contre une brique placée de champ. Pour recevoir le produit de la réaction qui s'écoulera, on construit une enceinte en briques, mesurant environ 75 × 75 centimètres et, sur le fond en brique, on étale une mince couche de sable sec.

L'endroit de la plaque qu'il s'agit de percer doit être posé à environ 10 ou 12 centimètres du trou de coulée. Le liquide en s'écoulant creuse instantanément dans la plaque un orifice de la grosseur du doigt, à bords nets et vifs; la plaque s'échauffe à peine par suite de la rapidité de la réaction.

Suppression des soufflures dans les lingots d'acier. — La *thermite* (mélange en parties égales d'oxyde de fer et d'aluminium, v. p. 83) permet d'empêcher la formation des soufflures, et notamment de la soufflure centrale, dans les lingots d'acier. Cette thermite spéciale est vendue en paquets dont le poids varie suivant la dimension des lingots. Son principal rôle est de réchauffer le métal de la masselotte et de lui permettre ainsi de combler les soufflures qui commencent à se former.

L'usage en est très simple : les paquets cylindriques, avec un trou qui les traverse de part en part suivant l'axe, sont attachés par un fil de fer à une barre de fer recourbée que l'on enfonce plus ou moins dans la lingotière. La réaction commence de suite, dure de cinq à six secondes, après quoi on retire la barre de fer.

Nous donnons ci-dessous le poids des paquets de thermite et celui des lingots correspondants :

Poids des lingots.	Poids de thermite.
0,5 à 1 tonne	1 ^{kg} ,3
1 à 2 —	2 ,5
3 —	3
9 —	7 ,5
15 —	10

Outre la disparition des soufflures, on constate la diminution des fissures dues au retrait et des liquations si fréquentes à la tête des lingots. Il semble que la thermite agisse par un brassage énergétique de la masse liquide, brassage produit de bas en haut par les

produits de la réaction plus légers que l'acier liquide. Ce brassage favorise l'expulsion des gaz, contrarie la liquation et réchauffe la tête du lingot qui commençait déjà à se solidifier.

Les essais effectués sur des éprouvettes prélevées au pied et à la tête de lingots ayant subi ce traitement ont montré un allongement particulièrement satisfaisant à la tête du lingot.

Au point de vue économique, on a constaté en outre un moindre pourcentage de chute ; le prix de l'addition de thermites est donc compensé et au delà par la meilleure utilisation du lingot.

II. — Applications dans l'industrie électrique.

Lignes électriques en aluminium. — Les conducteurs en aluminium présentent, dans de nombreux cas, des avantages économiques marqués sur ceux en cuivre ; dans d'autres cas, assez rares du reste, à défaut de ces avantages, leur moindre échauffement peut constituer une propriété importante. On sait en outre que, d'une façon générale, l'aluminium peut rivaliser avec le cuivre lorsque son cours n'est pas supérieur au double de celui de ce dernier métal, condition largement remplie depuis plus de quinze ans.

Rupture des fils. — Au point de vue de l'emploi de l'aluminium comme conducteur aérien, on a craint parfois la facilité de rupture des fils sous l'influence d'arcs électriques accidentels, par suite du point de fusion peu élevé de l'aluminium et du rapide abaissement de sa tension de rupture par élévation de température. D'après Dusaugé, l'expérience courante montre que les conducteurs d'aluminium se rompent moins facilement que les conducteurs de cuivre équivalents, cela en raison de la grande chaleur spécifique du conducteur d'aluminium et de sa plus grande surface de rayonnement. L'expérience suivante le démontre :

Un conducteur d'aluminium de 109 millimètres carrés de section, soumis simultanément à une tension de 13.500 volts, à une traction de 5 kilogrammes par millimètre carré (sécurité = 4) et à un arc absorbant 500 watts, se rompt au bout de 30 minutes dans une

atmosphère calme. Un conducteur de cuivre équivalent de 62 millimètres carrés de section, soumis au même voltage, à une traction de 10 kilogrammes par millimètre carré (sécurité = 4) se rompt au bout de 25 minutes dans les mêmes conditions.

Rapport des sections des câbles en aluminium et des câbles en cuivre. — Au point de vue du rapport des sections à employer, le parallèle peut être aisément établi entre l'aluminium et le cuivre, soit à égalité de conductibilité électrique, soit à égalité d'échauffement.

La conductibilité de l'aluminium (métal écroui, commercialement pur à 99,5 %) est de 60 % par rapport à celle du cuivre électrique commercial moyen. On a donc, entre les poids de deux conducteurs nus de cuivre et d'aluminium de même conductibilité, la relation suivante :

$$\frac{\text{Poids du cuivre}}{\text{Poids de l'aluminium}} = \frac{\text{Densité du cuivre}}{\text{Densité de l'aluminium}} \times \frac{60}{100} = \frac{8,9}{2,7} \times 0,6 = 1,98.$$

Le rapport entre les sections est :

$$\frac{\text{Section aluminium}}{\text{Section cuivre}} = \frac{100}{60} = 1,67.$$

A égalité de conductibilité, la section de l'aluminium est donc 1,67 fois celle du cuivre électrique commercial. On admet 1,70 dans la pratique. Au point de vue du poids, celui du câble d'aluminium n'est ainsi que les 83 centièmes de celui du câble de cuivre ayant même conductibilité, c'est-à-dire pour des sections respectives de 1.700 et 1.000 millimètres carrés. L'économie réalisée par l'emploi de l'aluminium varie ainsi entre 15 et 30 % suivant les sections.

Résistance d'isolement. — La résistance d'isolement des câbles en aluminium est un peu moindre que celle des câbles en cuivre par suite du plus grand diamètre des premiers pour une conductibilité égale. L'écart est d'autant plus faible que le diamètre est plus fort et l'épaisseur de l'isolant plus petite.

On trouve une différence de 4 à 5 % environ pour un isolant au papier de 2^{mm},75 d'épaisseur. Cette différence est presque négligeable.

geable étant donnée la marge admise légalement pour la résistance d'isolement.

Échauffement. — On sait qu'un conducteur en aluminium de même conductibilité qu'un conducteur en cuivre ne subit, sous l'action du courant, que 77,5 % environ de l'échauffement du conducteur en cuivre. A égalité d'échauffement, il est susceptible de supporter une intensité de courant de 14 % environ plus élevée.

D'après cela, les câbles en aluminium peuvent supporter des surcharges supérieures à celles des conducteurs en cuivre ; les interrupteurs automatiques qui protègent les canalisations d'aluminium peuvent aussi être réglés plus haut et les coupe-circuit être d'un calibre supérieur, ce qui diminue les risques d'interruption pour excès de charge.

En règle générale, il est admis pour l'échauffement des conducteurs isolés, non souterrains, une surélévation de température ne dépassant pas de plus de 20° la température ambiante. Il existe donc, pour chaque métal, une intensité maximum qui ne doit pas être dépassée. En mettant en regard les chiffres se rapportant au cuivre et ceux concernant l'aluminium, pour des conducteurs isolés et pour des câbles sous plomb et armés, on a, pour cette intensité, les chiffres suivants :

SECTION EN MILLIMÈTRES CARRÉS		INTENSITÉ MAXIMUM ADMISSIBLE EN AMPÈRES			
		CONDUCTEURS NON ISOLÉS, SOUTERRAINS		CÂBLES SOUS PLOMB, ARMÉS	
Cuivre	Aluminium	Cuivre	Aluminium	Cuivre	Aluminium
10	17	43	48	95	110
25	42,5	100	136	170	193
50	85	160	182	260	295
95	162	240	275	385	440
150	255	325	370	510	580
400	680	640	730	910	1.030
1.000	1.700	1.250	1.420	1.585	1.800

Rigidité diélectrique. — Au point de vue de la *rigidité diélectrique*, c'est-à-dire de la force qu'oppose l'isolant à la perforation par l'étin-

celle, la théorie et l'expérience démontrent qu'à égalité de fatigue de l'isolant, on peut sensiblement réduire l'épaisseur de la matière isolante dans les câbles équivalents à ceux du cuivre quant à la conductibilité, c'est-à-dire de rayon $r \times 1,303$. Il y a là un important facteur de réduction dans le prix de revient des câbles armés en aluminium et une importante compensation aux conséquences de l'augmentation du diamètre. Mais dans une canalisation à courant alternatif, où les phénomènes de capacité jouent un rôle important, l'épaisseur de l'isolant devant augmenter en même temps que le rayon du conducteur, l'emploi de l'aluminium n'est plus avantageux. Par contre, pour les transports à haute tension par courant continu, il existe des cas où l'emploi de l'aluminium est moins onéreux que celui du cuivre.

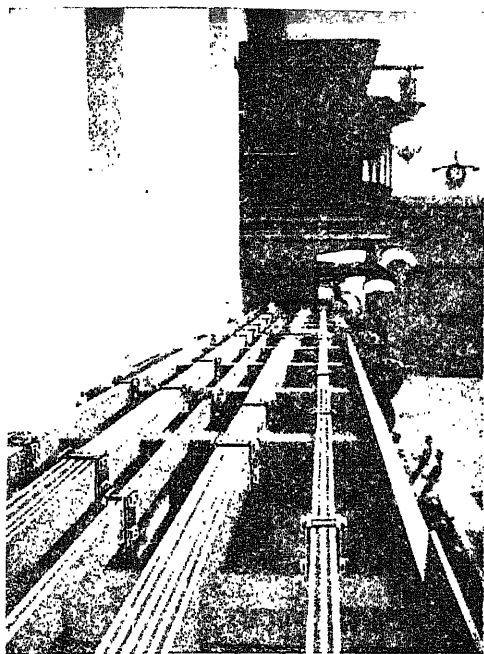


FIG. 32. — Conducteurs d'électricité constitués par des barres d'aluminium nues.

Emplois comme conducteur. — L'alumi-

nium à l'état de fil ou de câble est utilisé non seulement pour l'éclairage, mais aussi pour les lignes téléphoniques et télégraphiques, les connexions (fig. 32) apparentes ou en caniveaux, leaders de réseaux de tramways et de chemins de fer, les bobines de self et tout le petit appareil électrique courant : tableaux à basse et haute tension, appareils de laboratoire et de mesure, etc.

Barres de connexion. — Dans cette application, la condition

importante est que la température du conducteur ne s'élève pas au delà d'une certaine limite, car à cause de la faible longueur de ces conducteurs, la perte d'énergie est généralement très réduite. Les barres en aluminium ayant une superficie de rayonnement plus grande que celles en cuivre peuvent supporter une densité de courant plus élevée. Les connexions des barres peuvent être très bien réussies avec des boulons ou par la soudure autogène.

Dans le cas des courants alternatifs, l'aluminium rend ici de plus grands services que le cuivre par la diminution des courants de Foucault. Dans les mêmes conditions, ces courants sont de 40 % moindres que pour le cuivre. Ce point est important : tous ceux qui emploient des fours électriques à courants alternatifs savent en effet quels soins on doit prendre pour éviter les effets dangereux de ces courants. Aussi, dans beaucoup de fabriques d'aluminium, de carbure, de ferro-alliages, les barres d'aluminium sont-elles couramment employées comme connexions.

Enroulements et bobinages en aluminium nu. — L'aluminium se recouvre, comme nous l'avons vu (chap. 1), dès la température de 20° C. environ, d'une couche d'oxyde qui, bien qu'à peine visible, constitue une résistance assez grande pour qu'une différence de potentiel d'environ 0,5 volt soit nécessaire pour la percer. Cette propriété est utilisée dans la construction et le bobinage des électro-aimants, des solénoïdes, etc., avec du fil nu d'aluminium dont les spires peuvent ainsi se toucher sans l'intermédiaire d'une couche isolante supplémentaire.

Le dépôt d'alumine peut être effectué par différents procédés. En général, le fil est plongé dans une solution permettant d'effectuer presque instantanément un dépôt très mince d'alumine hydratée; cet hydrate perd son eau à 150° et devient complètement anhydre vers 300°; le métal est alors recouvert d'une couche d'alumine présentant une très bonne résistance d'isolement. Il peut y avoir de légères irrégularités dans la couche d'oxyde, mais aux endroits où cette dernière peut avoir été percée, il ne tarde pas à se faire un nouveau dépôt d'oxyde.

On a observé cependant qu'à partir d'une certaine température, soit 450° environ, l'isolement devient defectueux. Aussi l'emploi

du fil d'aluminium nu doit-il être limité, d'une façon générale, à l'enroulement des bobines de moteurs et génératrices à basse tension. L'avantage le plus important consiste dans le moindre poids des bobines ; cette réduction joue un rôle utile pour les pièces mobiles où elle a pour effet de diminuer la force centrifuge. Ainsi un alternateur à 16 pôles de 140 kilovolts-ampères, avec excitation normale de 30 ampères sous 120 volts, emploiera, pour ses bobines de champ, du fil d'aluminium de 4,25 millimètres de diamètre à raison de 4^h 50 par bobine ; la surface de radiation par watt devra être de 3,5 centimètres carrés, tandis qu'avec du fil de cuivre de 4 millimètres il faudra 15 kilogrammes de fil et 3,4 centimètres carrés par watt. Cette réduction de poids du roton s'accroît encore du fait de la diminution de la force centrifuge et, finalement, le prix de revient se trouve réduit de 20 % environ.

Éclairage électrique. — L'aluminium est actuellement utilisé dans *certaines lampes à arc* sous forme d'électrodes ayant la forme d'un L et pourvues de pointes en platine. L'écartement est réglé par un mécanisme très simple. Ces lampes, dans lesquelles on fait le vide, sont d'une très longue durée, ce qui permet de justifier jusqu'à un certain point l'emploi du platine.

Dans l'air, l'aluminium donnerait un arc de coloration bleue avec auréole jaune. Il est très instable et l'oxydation des extrémités des deux électrodes se manifeste rapidement en engendrant un déplacement continu de l'arc : celui-ci se porte sur les parties du métal non encore oxydées jusqu'à extinction complète. Dans l'hydrogène, on obtient une coloration rouge pourpre qui devient bleuâtre par l'allongement de l'arc ; mais celui-ci est toujours instable et donne naissance à des dépôts grisâtres abondants avec port d'aluminium d'une électrode à l'autre.

L'arc cuivre-aluminium est également instable. Il s'allume assez facilement, mais se déplace, siffle et tend à s'allonger. Dans le voisinage du cuivre, on observe une coloration verte et l'électrode en aluminium est fortement piquée. L'arc aluminium-cuivre est encore plus irrégulier ; sa coloration est celle des deux flammes réunies des métaux constituants, c'est-à-dire bleu verdâtre, mais plus nettement bleuâtre au voisinage de l'anode (aluminium) et

L'ALUMINIUM DANS L'INDUSTRIE

au voisinage du cuivre. Il se déplace continuellement et
ment s'éteint.

arc fer-aluminium donne dans l'air une flamme bleue avec
le jaune. On constate la formation d'un important dépôt de
r la cathode, l'arc paraissant se maintenir aux extrémités des
odes. L'arc aluminium-fer donne un dépôt analogue, l'usure
node étant relativement faible.

ant aux arcs charbon-aluminium et aluminium-charbon, ils
intienent assez bien jusqu'à une longueur de 8 à 10 milli-
s, pour une intensité de 10 à 12 ampères. On constate un
très net de charbon sur le métal. La flamme est de teinte
clair.

as la fabrication des *lampes à incandescence*, les fils d'alumi-
ont été utilisés dans certaines usines, concurremment au
e et à l'acier au nickel, comme fils de raccord entre les fila-
intérieurs et les contacts extérieurs. A cet effet, on laisse
uminium s'échauffer et se refroidir en ménageant autour de lui,
e verre, un espace libre. On verse une goutte de chlorure de
re sur le métal et, par oxydation, il se produit rapidement à
face de celui-ci une couche d'alumine, de sorte qu'il n'existe
interstice vide entre le verre et l'aluminium; de plus, les
de dilatation de ces deux substances sont ainsi contreba-
et leurs effets supprimés.

s et accumulateurs. — La pile Cole-Barnes se compose
rodes formées de magnésium (pôle négatif) et d'aluminium
ositif). L'électrolyte est de l'aluminate de potassium. Grâce à
oi d'un dépolarisant convenable, la tension aux bornes atteint

me accumulateur, l'aluminium aurait l'avantage de dimi-
poids des batteries d'une façon importante et cela consti-
un facteur de premier ordre dans le développement de la
tion électrique. On a essayé de tous côtés à résoudre le pro-
mais les solutions sont encore très imparfaites. Signalons
ant l'accumulateur dans lequel, pour la formation des
s, on emploie de l'aluminium et de l'oxyde de fer mis au
d'une solution n'attaquant pas l'aluminium. Le poids de

l'appareil n'est que le cinquième d'un accumulateur au plomb de même capacité ; il peut en outre supporter de fortes charges et fonctionne à peu de frais.

Parafoudres. — L'élément électrolytique en aluminium, composé de deux électrodes en aluminium immergées dans un électrolyte convenable et sur lesquelles on fait déposer de l'alumine hydratée, présente la propriété importante d'être le siège d'un courant extrêmement faible tant que le voltage auquel on le soumet reste inférieur à une certaine valeur ; dès que le voltage aux bornes des éléments atteint ou dépasse cette valeur critique, le courant devient très intense et n'est plus limité que par la faible résistance intérieure des éléments. Quand le voltage est redevenu normal, c'est-à-dire redescend au-dessous de la tension critique, l'intensité reprend aussi sa valeur initiale, c'est-à-dire redevient pratiquement nulle.

L'action de la pellicule d'oxyde peut donc être comparée à celle d'une soupape de sûreté, s'ouvrant et livrant passage au courant dès que le voltage atteint ou dépasse une valeur déterminée. Il y a lieu cependant de signaler l'influence de la durée de service, de la température, de l'action de l'humidité, des intermittences dans l'utilisation de l'élément, qui influent plus ou moins sur son fonctionnement. Il y aurait, en quelque sorte, sur les électrodes une infinité de petits clapets s'ouvrant dès que la pression électrique atteint la valeur critique et livrant alors passage à un courant intense distribué également sur toute sa surface.

On a construit, d'après ce principe, un parafoudre constitué par une ou plusieurs séries de cônes ou cuvettes coniques superposées en aluminium. Chaque cuvette reçoit une certaine quantité d'électrolyte qui remplit ainsi partiellement l'intervalle compris entre deux cuvettes adjacentes. L'ensemble des cônes est ensuite immergé dans un bain d'huile remplissant une cuve en acier. Chaque parafoudre a autant de séries de cônes qu'il y a de phases à protéger dans le circuit. Dans le cas d'un circuit à point neutre non mis à la terre, on ajoute une série additionnelle de cônes, branchée entre ce pôle commun et la terre.

Redresseurs de courants alternatifs. — Il est facile de réaliser un appareil simple utilisant l'aluminium comme redresseur de courants alternatifs. Celui de Déverin comprend quatre cuves ayant chacune, comme dimensions extérieures, 10, 30 et 32 centimètres. L'électrolyte est une solution non saturée de borate d'ammonium obtenu en ajoutant du carbonate d'ammonium à une solution chaude d'acide borique. Les électrodes sont des plaques de fer et d'aluminium épaisses de 8^{mm}. Cette soupape peut supporter 6 ampères. On peut également se servir, pour alimenter une lampe à arc, d'un simple bocal d'un litre rempli d'une solution de phosphate de sodium et dans lequel plongent une électrode de plomb et une électrode d'aluminium; dans le dernier cas, cette soupape sert à la fois de redresseur et de résistance.

III. — Applications dans l'industrie mécanique.

D'une façon générale, la construction mécanique utilise l'aluminium sous forme de tubes, profilés, barres, tôles, cornières. Les tubes et profilés peuvent être obtenus par les méthodes courantes; ils paraissent cependant posséder des propriétés mécaniques plus intéressantes lorsqu'ils sont obtenus par tréfilage à froid. On fait passer le métal à froid à travers les filières à l'aide de puissantes presses hydrauliques qui peuvent exercer sur l'aluminium une pression de 230 kilogrammes par millimètre carré. La résistance mécanique est ainsi accrue dans des proportions remarquables : le resserrement moléculaire produit par la compression se traduit d'ailleurs par une augmentation sensible de la densité du métal. En outre, l'énorme travail auquel est soumis l'aluminium pour passer dans les filières l'échauffe à un tel point qu'il n'a pas besoin d'être recuit et qu'il accuse un allongement très satisfaisant, soit 12 à 15 %.

D'autre part, les barres et tôles d'aluminium se fabriquent par laminage depuis la tôle de 3 millimètres d'épaisseur jusqu'aux feuilles les plus minces qui rentrent dans la catégorie des papiers métalliques (v. p. 93). La tôlerie et la chaudronnerie d'aluminium remplacent, en effet, depuis plusieurs années la chaudronnerie de

cuire dans nombre d'applications. Les tôles d'aluminium sont employées dans les constructions légères et la carrosserie.

Industrie automobile. — Dès les débuts de l'industrie de l'automobile, l'aluminium trouva des applications variées, notamment dans la fabrication des carters de moteurs et de changements de vitesse, des volants de direction, des corps de pompe. Ces emplois se sont rapidement généralisés malgré la concurrence des pièces en bronze, en laiton, en acier coulé ou en fonte malléable et ils constituent actuellement un des principaux débouchés de l'aluminium. D'après Pitaval, les principales fonderies d'aluminium s'adonnant à la fabrication des pièces automobiles se trouvent dans la Haute-Saône, la Haute-Marne, les Ardennes et les environs de Paris.

Dans la carrosserie automobile, on utilise l'aluminium en tôles pour la fabrication des caisses de voitures, surtout depuis qu'on a découvert des colorants adhérant parfaitement à ce métal. Plusieurs maisons fabriquent des roues de camions automobiles en aluminium qui sont, paraît-il, d'une grande élasticité. Dans certaines roues, les bandages sont en acier ; ceux des roues motrices sont munis de plaques d'usure également en acier, mais dans les intervalles sont fixées des lamelles en aluminium qui évitent le patinage et le dérapage en raison de la rugosité que présente ce métal dès le plus petit frottement.

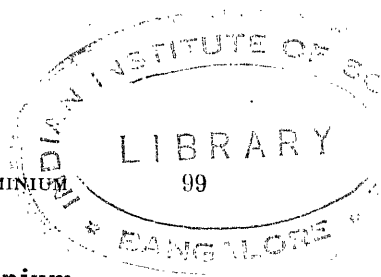
Jusqu'ici on avait précisément rejeté l'aluminium dans la construction des *cylindres de moteurs* parce qu'il semblait acquis qu'il ne supportait aucun frottement. La question a été mise au point par de nombreux industriels par le frottement de ce métal sur des cylindres de moteurs ou toute autre pièce mécanique que l'on désire couler en aluminium et auxquels on veut conserver des parties frappantes en fonte, fer, acier ou bronze. On coule d'abord en fonte, sous une épaisseur de 3 à 6 millimètres selon l'alésage, un cylindre entièrement nu, sans aile ni bride de fixation. Cette pièce, ou âme, est alésée, tournée extérieurement, limée et usinée, les sièges de soupapes sont fraisés et les pas de vis terminés. La pièce, absolument saine, ainsi obtenue est placée comme noyau dans un châssis spécial dans lequel sont montées les ailettes, brides de fixation et autres organes

du cylindre. L'aluminium est alors coulé dans le moule et, en se refroidissant, frette le cylindre en donnant une pièce légère, solide et présentant les avantages suivants : 1° refroidissement des cylindres par ailettes d'aluminium frettées et suppression de la chemise d'eau ; 2° plus grandes solidité et légèreté des cylindres ; 3° examen préalable de la fonte avant l'opération du frettage, toute pièce reconnue défectueuse à l'usinage étant éliminée.

Aéronautique et aviation. — Dans la construction des dirigeables et des aéroplanes, l'aluminium est employé de plus en plus, grâce à sa légèreté et à sa résistance élevée. C'est ainsi que les dirigeables rigides et demi-rigides en emploient de grandes quantités. L'aluminium écroui présente en effet des qualités mécaniques qui peuvent le faire considérer comme un alliage différent du métal ordinaire.

Il peut aussi convenir parfaitement aux multiples besoins de la construction des aéroplanes (barres, profilés, tubes), qui devra s'orienter désormais vers la réalisation d'une plus grande robustesse des appareils.

Constructions navales. — L'industrie de la construction navale a utilisé pendant plusieurs années une certaine quantité de tôles formées d'un alliage de cuivre et d'aluminium (bronze d'aluminium). On a reconnu depuis qu'il était préférable de réserver à cet usage l'aluminium pur de première qualité. Les tôles, moulages, rivets, etc., en aluminium pur pour la construction des cabines et autres parties des grands bâtiments placées au-dessus de la ligne de flottaison dont il est important de réduire le poids pour augmenter la stabilité du navire, peuvent ainsi rendre de grands services. On a utilisé, du reste, d'importantes quantités de tôles d'aluminium pour la construction des roufles et on s'en est déclaré satisfait. Ajoutons qu'on a aussi employé avec succès l'aluminium pour la construction des barques, yachts et bateaux automobiles destinés à la navigation sur lacs, fleuves et canaux.



IV. — Papier et poudre d'aluminium.

Papier d'aluminium. — La fabrication du papier d'aluminium est d'une grande importance industrielle et pratique, vu les nombreux emplois dont il est susceptible, concurremment au papier d'étain principalement ; mais elle n'est pas exempte de nombreuses difficultés.

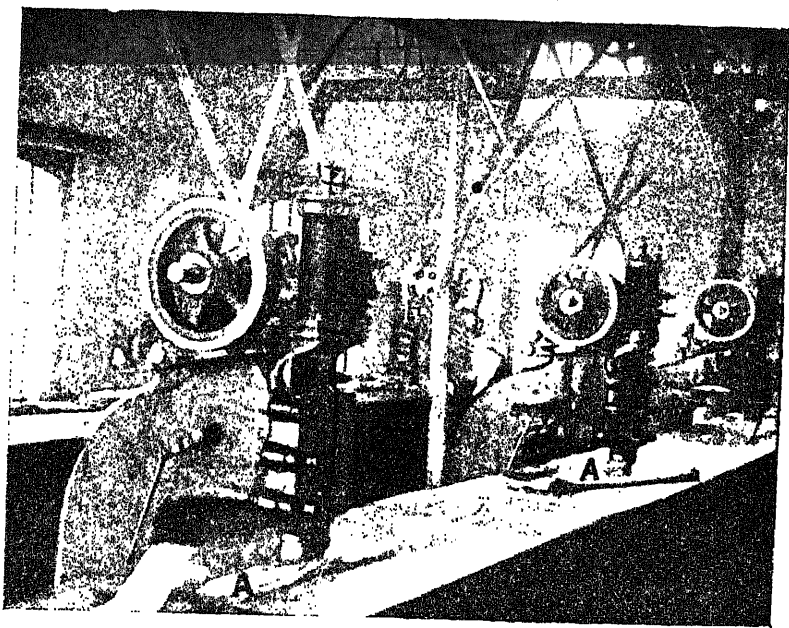


Fig. 33. — Marteaux pneumatiques pour le battage de feuilles d'aluminium (A).

On part d'un lingot coulé entre 750° et 775° ; le laminage se fait à 420° environ, c'est-à-dire à la température dite du bois fumant. Aux usines de La Praz (Savoie) et de Charleval-sur-Andelle (Eure), le lingot initial a généralement $70 \times 32 \times 12$ centimètres. Il est laminé de manière à être amené à une épaisseur de $3^{mm},5$; on obtient ainsi une bande d'une largeur de 33 centimètres environ dont les bords ne sont pas rectilignes. On y découpe quatre bandes de 8 centimètres de largeur ; ces bandes sont recuites à 420° , puis lami-

nées à froid, l'opération du laminage comprenant en quelque sorte trois périodes : l'alimentation de la matière à travers une filière, le laminage proprement dit et l'enroulement de la matière laminée.

Ce laminage se fait en six passes jusqu'à une épaisseur de $4/100$ de millimètre. Pour les épaisseurs inférieures à ce chiffre, on procède, soit par battage, soit par laminage.

a) *Procédé par battage*. — Les feuilles sont coupées à un mètre de longueur. On place les unes sur les autres 500 feuilles de $4/100$ de millimètre que l'on recuit. On les bat (fig. 33) de façon à les amener à $3/100$, on ajoute un autre paquet semblable et on les place à nouveau les unes sur les autres : on a donc 1.000 feuilles de $3/100$. On les bat pour les amener à $2/100$, on ajoute encore un autre paquet : on a ainsi 2.000 feuilles de $2/100$ que l'on bat à $1/100$. Le battage s'effectue à l'aide de marteaux pneumatiques de 150 kilogrammes donnant 300 coups à la minute ; les feuilles d'aluminium sont enserrées entre deux feuilles de zinc. Les pertes sont considérables (laminage, coupage, battage, décollage) et le rendement ne dépasse généralement pas 35 %.

Une des plus grandes difficultés est le découpage, le phénomène de la soudure autogène de l'aluminium jouant ici un rôle particulièrement néfaste. En effet, lorsqu'on découpe deux feuilles de ce métal, très serrées l'une contre l'autre par le laminage qui a chassé tout l'air interposé, on brise la mince couche d'alumine qui peut exister ; l'aluminium mis à nu se soude à lui-même d'une feuille à l'autre ou, tout au moins, se colle sous l'influence du massicot et la séparation est impossible.

Pour éviter cet inconvénient, on peut utiliser l'un des trois procédés suivants : 1° intercaler du papier ; 2° gaufrer les feuilles en les faisant passer entre deux cylindres, l'un en papier, l'autre en acier ; 3° laisser l'aluminium uni, mais l'amener mécaniquement à l'état feuilleté.

b) *Procédé par laminage*. — Les bandes sont graissées et laminées par deux jusqu'à $2/100$ de millimètre et par quatre jusqu'à $1/100$ (fig. 34). On enroule le produit laminé. Dans cette opération,

on rencontre des difficultés, la bande très mince et très longue de métal (16 mètres environ) se cassant aisément. De plus on est toujours en présence des mêmes difficultés de coupage pour l'industriel qui utilise ces bandes à la confection des emballages.

D'après Guillet, cette méthode paraît cependant susceptible d'une grande extension, vu qu'on utilise déjà des *machines* d'emballage pour le chocolat et autres produits alimentaires : ces machines peuvent se servir de rouleaux d'aluminium sans qu'il soit nécessaire de procéder au découpage de ces feuilles au carré.

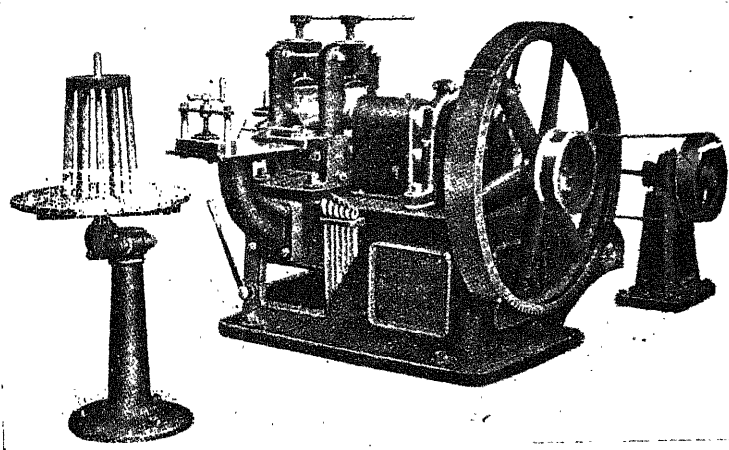


FIG. 34. — Laminage pour la fabrication du papier d'aluminium.

Une feuille d'aluminium froissée prend une teinte tout autre que l'aluminium laminé par suite des multiples facettes irisées ainsi créées et qui donnent naissance à nombreux reflets. Cette propriété, qui n'est du reste pas spéciale à l'aluminium, peut être utilisée pour de nombreuses applications décoratives ou autres.

Nous ignorons si le *moirage* de l'aluminium est pratiqué industriellement. Son application rendrait de grands services, notamment pour la fabrication des rubans métalliques devant séjourner à l'air (palmes et couronnes mortuaires, etc.). L'obtention du moiré semble exempt de toutes difficultés pratiques avec les presses.

Poudre d'aluminium. — La poudre d'aluminium, qui est surtout utilisée pour la fabrication de la *peinture d'aluminium*, est généralement préparée à l'aide des tombées de coupe des feuilles et papiers d'aluminium. L'opération a donc pour but de désagréger ces feuilles en les amincissant de plus en plus jusqu'à les réduire en poudre. Cette dernière, examinée au microscope, est constituée par une infinité de paillettes dont l'épaisseur n'est que de quelques

millièmes de millimètres, mais dont les autres dimensions sont relativement appréciables par rapport à l'épaisseur.

Le début de la fabrication est très délicat et concerne l'emploi de pilons (*fig. 35*) qui viennent tomber, à raison de 75 rotations à la minute, dans une cuvette en couronne de construction spéciale. L'alimentation est faite d'une façon continue par un orifice communiquant avec une trémie extérieure; la sortie s'effectue aussi automatiquement par l'intermédiaire de tamis; ces derniers sont reliés à des boîtes à tiroirs et c'est ainsi qu'on obtient la grosse paillette.

Pour empêcher le collage des

paillettes, on emploie de la stéarine que l'on râpe en poudre, mais qui est rapidement rendue fluide par la chaleur dégagée pendant le travail; elle est introduite, à raison de 2 % seulement et en même temps que la paillette, dans les batteries successives de pilons fermés où se termine le travail. Le produit des derniers pilons donne lieu à un tamisage dans une bluterie à toile de soie.

La poudre qui a traversé la toile n° 200 est réputée finie, mais elle doit, pour être propre à ses usages, subir encore un traitement résultant d'une très fine et régulière division. Cette dernière est réalisée à l'aide de machines composées d'un cylindre dans lequel

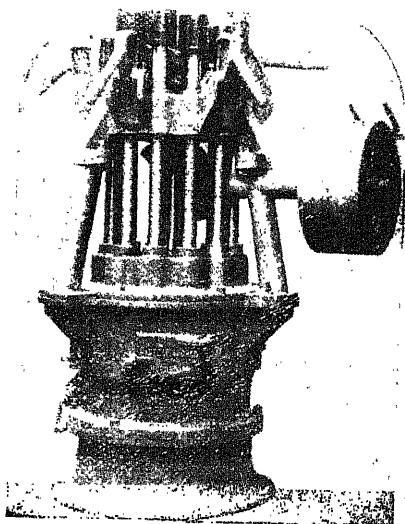


FIG. 35. — Pilon pour la fabrication de la poudre d'aluminium (grosse paillette).

la poudre est introduite par une tubulure, pour être brassée par un arbre vertical muni d'ailettes à sa partie inférieure. La vitesse de rotation de ces machines est calculée de façon que la poudre légère, par conséquent finement divisée, soit mise en suspension par les ailettes et vienne se fixer dans des boîtes accrochées à la paroi intérieure sur un rail hélicoïdal. La hauteur des boîtes sur

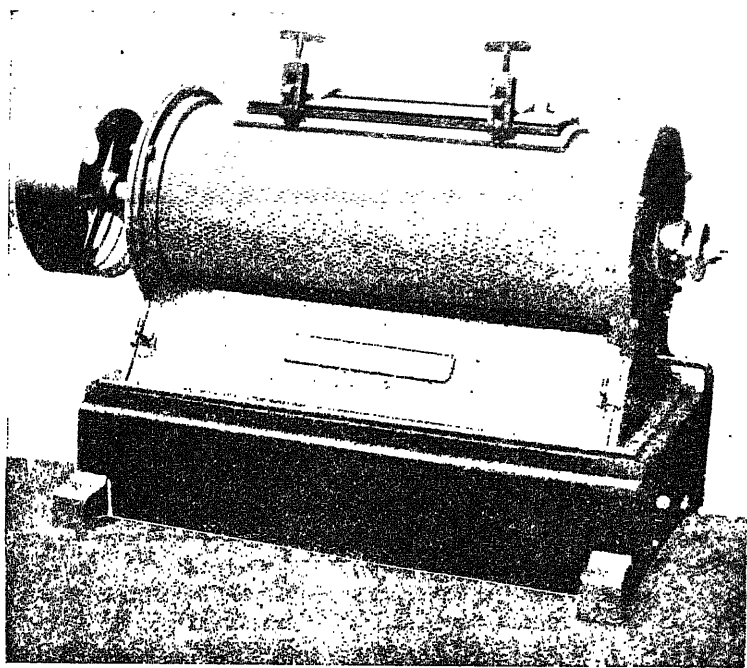


FIG. 36. — Machine à polir ou « brillanteuse » pour la fabrication de la poudre d'aluminium (d'après L. Guillet).

le rail donne un classement par légèreté, et la poudre qui se refuse à monter dans les boîtes se rend dans un tiroir inférieur d'où on la retire périodiquement; elle sert alors à amorcer les pilonnages de paillettes de l'opération précédente.

La poudre recueillie dans ces machines, dites « élévatrices », est ensuite polie pour la rendre brillante. Ce travail s'effectue à l'aide de machines appelées « brillanteses » et composées de cylindres horizontaux en tôle striée (fig. 36 et 37); l'axe horizontal porte

trois brosses à 120° qui appuient sur la surface intérieure du cylindre dans toute sa longueur. Le frottement de ces brosses sur le relief des tôles amène les particules d'aluminium à se polir tant sur l'acier que sur elles-mêmes, et après dix heures de travail, la poudre est enfin finie.

Il convient d'ajouter que cette dernière opération se fait en plein air, à cause des dangers d'explosion dus à l'élévation de température provenant du frottement des brosses sur l'acier.

Les pertes de poudre sont réduites au minimum à l'aide d'une vis d'Archimède qui conduit la poudre finie dans des fûts métalliques destinés à l'expédition.

Peintures anti-rouilles à l'aluminium. — Le principal débouché de la poudre d'aluminium, actuellement, est la fabrication de *peintures anti-rouille*, qui permettent d'effectuer à froid un dépôt d'aluminium sur les constructions métalliques. La peinture d'aluminium, grâce au coefficient de dilatation élevé de ce métal, ne se craquelle pas sous l'influence de la chaleur, même à des températures très élevées. Elle sert notamment au recouvrement des conduites d'eau et de gaz, des récipients de grande dimension, des boîtes utilisées dans l'industrie alimentaire, des lignes électriques aériennes; c'est du reste grâce à cet usage que les lignes du Métropolitain de Paris doivent leur reflet métallique grisâtre. On l'emploie pour peindre par immersion les grilles en fonte des résistances électriques, les tuyaux et pots d'échappement des automobiles. On l'applique également aux installations de chauffage à vapeur et à air chaud, aux conduites de distribution d'eau chaude, radiateurs, etc. C'est une peinture véritablement métallique ne s'oxydant pas et par conséquent ne ternissant pas. De là l'utilisation de la poudre d'aluminium pour la préparation de certains vernis et enduits ignifuges destinés à recouvrir le bois et le plâtre.

La poudre d'aluminium remplace la poudre d'argent dans l'imprimerie où elle présente l'avantage d'être plus économique et de mieux adhérer au papier. La fabrication des papiers dits métallisés est du reste une véritable industrie et mérite quelques détails.

Papiers métallisés à l'aluminium. — Ces papiers, utilisés principalement dans l'industrie alimentaire, sont fabriqués à l'aide de parchemin artificiel, c'est-à-dire de papier sulfurisé ou analogue. Les feuilles étant étendues, on applique sur une des faces une légère couche de solution de résine dans un mélange de liquides volatils, tels que l'alcool ou l'éther. On accélère l'évaporation par

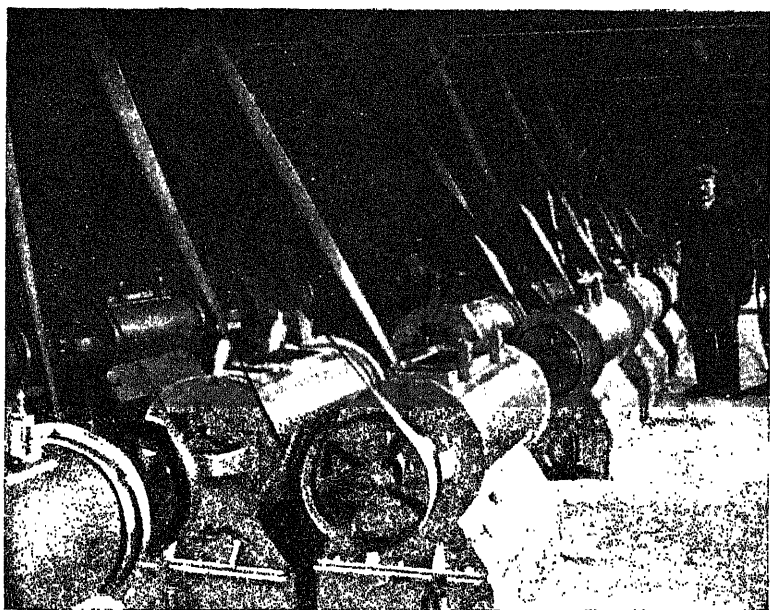


FIG. 37. — Vue d'ensemble d'une salle de machines à polir la poudre d'aluminium.

un courant d'air, puis on chauffe faiblement le papier jusqu'au ramollissement de la résine. On recouvre alors de poudre d'aluminium et l'on soumet l'ensemble à une action mécanique pour produire l'adhérence.

Les feuilles ainsi obtenues ont la souplesse des feuilles d'étain, et cela présente un grand intérêt au double point de vue commercial et hygiénique.

En effet, le papier métallisé à l'aluminium est très peu perméable à l'air et à l'humidité, ce qui permet de l'utiliser concurremment

au papier d'étain pour envelopper les substances alimentaires. Du reste, si l'étain est un métal existant généralement à l'état de pureté dans son minerai, la cassitérite, il ne faut pas oublier qu'on le retire aussi en grande partie des déchets de boîte de conserves, et que, dans ce cas, il est à redouter qu'il contienne du plomb ; d'autre part, on a souvent tenté d'ajouter du plomb à l'étain pour diminuer son prix, ce qui n'est pas sans inconvénient au point de vue de l'hygiène alimentaire.

Le papier métallisé se fabrique industriellement jusqu'à des épaisseurs très minimales ($\frac{1}{100}$ de millimètre) ; il possède une grande souplesse, est d'un prix très modique et se conserve presque indéfiniment.

V. — Applications diverses.

Industries chimiques et alimentaires. — Pour le *traitement* et la *conservation des liquides acides*, on emploie couramment des bacs en aluminium, notamment en ce qui concerne l'acide sulfurique et l'acide nitrique ; ces acides n'attaquent en effet l'aluminium que superficiellement et la pellicule ainsi formée protège le reste du métal contre toute attaque ultérieure. Dans l'industrie de l'acide nitrique, on utilise l'aluminium pour la construction des appareils de condensation, de refroidissement, de transport, etc. ; toutefois, il faut veiller à ce que la teneur en bioxyde d'azote de l'acide soit inférieure à 5 % pour une concentration de l'acide supérieure à 65 % de monohydrate ; cela revient à dire que cette teneur en bioxyde d'azote doit être moindre que celle qui, pour une concentration déterminée, correspond à une attaque de l'aluminium.

Dans la chimie des *explosifs*, l'aluminium, quoique nouveau venu, sert à la fabrication de plusieurs produits intéressants. Citons entre autres l'*ammonal*, constitué par un mélange d'aluminium et de nitrate d'ammoniaque pulvérisés. Ce mélange, enflammé à l'air libre, brûle rapidement en émettant une très vive lumière ; mais, enflammé sous pression, il explose avec force. On peut le préparer au moment même de son emploi, ce qui évite tout accident possible par sa conservation. Le *Prométhée III* est un mélange de

chlorate de potassium, d'oxyde de fer et d'aluminium en poudre ; lors de son utilisation, on l'imbibe d'un mélange d'essence de térébenthine et de phénol ; c'est un explosif ayant un pouvoir brisant considérable.

On a songé également, à l'aide de la poudre d'aluminium, à préparer l'*hydrogène*. Le procédé imaginé par Mauricheau-Beaupré consiste à mélanger intimement la limaille d'aluminium à une petite quantité de chlorure mercurique et de cyanure de potassium pulvérisé. Ce mélange, auquel on a donné le nom d'*hydrogénite*, se conserve indéfiniment à l'abri de l'humidité. Traité par l'eau, il laisse dégager environ 1.300 litres d'hydrogène par kilogramme de produit.

Il faut enfin signaler l'emploi de l'aluminium dans la *précipitation de l'argent* des bains de cyanuration. Cette réaction est mise à profit aux mines de Deloro (Canada) ; l'argent contenu dans les solutions des bacs de cyanuration est précipité, non pas au moyen de zinc comme dans le cas habituellement employé, mais par de la poudre d'aluminium en présence de la soude caustique.

Dans la cuve de précipitation, il est indispensable d'entretenir un courant central descendant, pour faire arriver au fond du bain l'aluminium en poudre qui a une tendance à surnager. Après précipitation, on fait, comme dans le procédé courant, passer le liquide dans un filtre-pressé et on fond, après lavage, les résidus solides restant dans ce filtre. On obtiendrait ainsi des lingots d'argent contenant jusqu'à 99,9 % d'argent fin. Ce procédé est, paraît-il, très avantageux aussi au point de vue de la dépense de produits chimiques.

Dans l'*industrie de la brasserie*, l'aluminium est utilisé pour la construction, par soudure, des foudres et des cuves de fermentation ; il est en effet inaltérable au contact des moûts, et le nettoyage des récipients se fait avec la plus grande facilité. Les tôles d'aluminium employées à cet effet doivent être en métal très pur ; des échantillons reconnus défectueux à l'usage et analysés ensuite renfermaient 0,7 % de silicium et 0,5 % de fer.

L'oléine, qui rougit dans le fer, reste incolore dans l'aluminium ; les *acides gras*, qui se colorent facilement en vert dans les appareils en cuivre ou en gris dans les appareils en plomb, ne sont pas colo-

rés par l'aluminium. Toutefois, les acides gras volatils l'attaquent; on n'y doit donc pas travailler des graisses rances.

L'aluminium peut aussi rendre de grands services dans l'industrie des *produits pharmaceutiques*, des éthers et des essences, des huiles et des acides gras, dans la fabrication des conserves, etc.

L'emploi de ce métal est surtout indiqué dans l'industrie de l'*acide stéarique*, ainsi qu'il ressort d'essais faits par Donath, dès 1895, et suivis ensuite par Pastrovitch après une période d'essais en grand ayant duré plusieurs années; des plaques de revêtement en aluminium, qui servaient à recouvrir les plateaux en fer des presses à chaud, n'ont subi, en deux ans, qu'une diminution de poids insignifiante, 1,37 %, sans qu'aucune attaque fût visible, tandis qu'une garniture en cuivre, qui servait dans les mêmes conditions, montra une usure dix fois plus forte.

On peut dire que les *graisses* et les *acides gras* sont à peu près sans action sur l'aluminium, même à température élevée et en présence d'air, ce qui, comme on sait, rend l'attaque des métaux plus énergique. Un des grands avantages de ce métal c'est qu'en faisant les presses et les appareils de fusion et de cristallisation des acides gras en aluminium, on en diminue notablement le poids.

De même, l'aluminium pourrait servir dans les *raffineries d'huiles*, en savonnerie, dans la fabrication des huiles essentielles, la rectification des glycérines, la préparation des vernis au copal, la fabrication des conserves, confitures, gelées, marmelades, du lait condensé, dans la concentration des vins, cidres et poirés, etc.

Ajoutons que le noircissement du *cognac* dans les tonneaux par le gallate de fer à l'état de traces peut être supprimé et le liquide rendu à sa couleur initiale par immersion de lames d'aluminium pendant quinze jours dans le cognac. D'après M. Kohn-Abrest, l'aluminium décolorerait un certain nombre de rhums naturels, mais serait sans action sur les rhums artificiels.

Depuis quelque temps, on cherche à remplacer l'aluminium par de la tôle d'acier doux soudée, dont la surface extérieure ou intérieure, suivant les emplois, est recouverte d'aluminium d'après le procédé Schoop (V. p. 117); la couche protectrice ainsi obtenue est identique à la tôle d'aluminium; seule la densité du métal est augmentée.

Photographie. — Photo-poudres à l'aluminium. — On utilise depuis longtemps le magnésium en poudre comme producteur de lumière pour la photographie instantanée et, à ce titre, les qualités de ce métal sont réelles. Il possède en effet deux propriétés nécessaires à l'obtention d'une bonne lumière oxymétallique: un grand pouvoir d'oxydation et une activité chimique de lumière relativement élevée; c'est sa facile et rapide oxydation qui fait de l'« éclair magnésique », comme on l'appelle, une lumière instantanée. Mais cette qualité a son défaut, car le magnésium, exposé à l'air humide, se transforme aisément en carbonate et ne brûle plus; il faut donc avoir soin de le préserver de l'humidité. L'activité de sa lumière est due à la présence, dans le spectre de ce métal, de trois raies localisées dans l'indigo et le bleu (rayons de grande activité chimique), contrebalancées seulement par quatre de bien moindre importance localisées dans le vert et le jaune.

Or l'aluminium est beaucoup moins altérable que le magnésium, il ne l'est même pas du tout à la température ordinaire et la mousse d'aluminium se conserve sans qu'il soit utile de la mettre à l'abri de l'air humide. De plus, l'aluminium est d'un prix beaucoup moins élevé que le magnésium, parfois même fort difficile à se procurer. Enfin, il est le seul métal (après le calcium, très rare, possédant des raies spectrales voisines de la partie ultra-violette, alors que le magnésium n'en possède, comme nous venons de le voir, que dans l'indigo et le bleu.

En comparant les résultats obtenus avec ces deux métaux, aluminium et magnésium, l'avantage se fait nettement sentir en faveur du premier; on remarque notamment qu'avec l'aluminium les colorations naturelles rouge et jaune gardent sensiblement leur valeur, tandis qu'avec le magnésium la relativité n'existe pas. Il y a donc, entre l'actinisme des deux lumières oxyaluminique et oxymagnésique, une différence considérable.

D'après ces données, on a établi différentes *photo-poudres à l'aluminium* dont l'une, due à M. Demole, présente la composition suivante :

Aluminium.....	1 partie
Permanganate de potassium.....	2 —

Le permanganate doit être finement pulvérisé et être très pur. Le mélange ci-dessus brûle alors avec facilité et rapidité; il permet donc l'instantané.

En augmentant plus ou moins le permanganate, la rapidité de combustion est diminuée, mais la fumée est beaucoup augmentée.

On emploie aussi le mélange suivant :

Aluminium.....	4 grammes
Chlorate de potasse.....	10 —

Il ne faut pas oublier cependant que ce mélange constitue un véritable explosif, et que sa préparation doit être effectuée prudemment. Les doses de produits sont d'abord versées, en deux tas séparés, sur une feuille de papier, puis mélangées lentement avec une tige de bois. En aucun cas, on ne doit mélanger ou manipuler plus de 30 à 40 grammes de mélange. Si on prévoit l'emploi d'une assez grande quantité de photo-poudre, on devra fractionner la préparation en plusieurs doses, conservées par petits paquets séparés de manière à diminuer les risques d'explosion. La durée de combustion de 1 gramme est de $\frac{1}{5}$ de seconde. On peut l'accélérer notablement en ajoutant au mélange du sulfure d'antimoine d'après la formule :

Aluminium.....	3 ^{gr} ,6
Chlorate de potassium.....	10
Sulfure d'antimoine.....	2,2

Ce mélange est aussi dangereux à manier que le précédent et nécessite par conséquent les mêmes précautions ; 1 gramme de matière brûle en $\frac{1}{17}$ de seconde. On peut remplacer le chlorate par le perchlorate, qui est aussi un oxydant très énergique et permet d'obtenir un mélange photogène résistant mieux au choc. La formule est la suivante :

Aluminium.....	10 grammes
Perchlorate de potassium.....	6 —

Une méthode toute différente consiste à utiliser l'aluminium seul, sous forme de *fils très fins* analogues à ceux employés dans les coupe-circuit. Un fil de ce métal mis en court-circuit sur une ca-

nalisation électrique se volatilise immédiatement en émettant une lumière très vive et de très courte durée. Bien entendu, il convient de disposer la dérivation de la canalisation de façon à ne pas nuire à sa sécurité.

Quincaillerie et ustensiles de ménage. — Dans la petite mécanique, quincaillerie, bimbeloterie, industrie du bâtiment, les emplois de l'aluminium sont très nombreux et se multiplient chaque jour concurremment au fer, au cuivre et aux alliages blancs. Mentionnons les clefs, plaques de propreté pour portes, poignées de fenêtres, lettres pour enseignes lumineuses, pièces pour filatures et tissages, bobines, poulies, manches d'outils, fers à cheval, agrafes inoxydables, grains de chapelet, viroles, pièces de bicyclettes, etc.

Les ustensiles de cuisine et de ménage en aluminium, qui font l'unique objet de fabrication de plusieurs usines importantes, sont confectionnés en adoptant, soit le métal moulé, soit le métal estampé ; l'un et l'autre donnent de bons résultats. L'utilisation de l'aluminium à la confection des ustensiles de cuisine et de ménage n'est du reste pas une innovation, et elle est certainement la plus populaire de ce métal ; son extension considérable est justifiée par les précieuses propriétés (V. chap. I) qu'il possède. Sa haute conductibilité calorifique, sa chaleur spécifique extrêmement élevée, son faible pouvoir émissif justifient aisément le bien-fondé des assertions contenant ces applications spéciales. Malgré les griefs formulés autrefois contre les dangers de l'aluminium pour la santé, on a reconnu aujourd'hui, d'une façon définitive, que ce métal offre toutes les garanties au point de vue de l'hygiène et de la salubrité.

L'entretien (v. p. 70) et la conservation des ustensiles en aluminium sont extrêmement faciles, à condition d'observer certaines précautions comme on le fait avec la batterie de cuisine en cuivre ; la plus élémentaire précaution est évidemment de ne pas les nettoyer avec des cristaux de soude.

L'armée française a du reste depuis longtemps adopté du matériel en aluminium. Les explorateurs en font un usage constant qui a reçu la consécration d'une longue pratique.

On fabrique également des couverts en aluminium ; ils sont

légers, solides et d'un usage pratique et commode. L'industrie de la laiterie fait aussi un très grand usage des *réipients* de tous genres en aluminium. Le lait frais ou aigri, les vins rouges et blancs, les solutions au dixième de chlorure de sodium, d'iodure de potassium, d'azotate de sodium, de sulfate de potassium, de chlorure de calcium, d'azotate de calcium n'attaquent pas l'aluminium pur. Par contre, la solution de bicarbonate de soude à 1/10 l'attaque ainsi que les solutions de sulfate de magnésium et de sulfate de calcium; il en est donc de même d'un grand nombre d'eaux minérales bicarbonatées sodiques et calciques.

Signalons en outre l'emploi de l'aluminium pour la fabrication des *mesures de capacité* destinées au mesurage des liquides. Il a été autorisé par un décret du 12 novembre 1908.

Emplois dans l'industrie du gaz. — La *toile d'aluminium* est utilisée pour la fabrication d'objets spéciaux, notamment des tubes souples tels que ceux employés comme conduites d'éclairage. Ce sont en général des tuyaux de caoutchouc comprimé recouverts d'une enveloppe faite d'un tissu spécial et sur laquelle on a ensuite tissé une toile d'aluminium. Cette dernière, qui est très élastique malgré sa constitution métallique, assure au tube une très longue durée et facilite en outre son nettoyage. On désigne les tubes ainsi fabriqués sous le nom de *gaine tube-aluminium*.

L'aluminium jouit, en outre, de la propriété d'être inattaquable aux vapeurs sulfureuses (acide sulfureux, hydrogène sulfuré, etc...) et aux gaz des purificateurs contenant plus ou moins de composés cyanogénés; il n'est pas altéré non plus par l'ammoniac et ses composés. On a constaté que des conducteurs en cuivre électrolytique de 30 millimètres de diamètre et 6 mètres de longueur exposés aux vapeurs sulfureuses provenant d'extinction de coke, devaient être remplacés au bout de deux ans, étant complètement corrodés. Cet inconvénient est supprimé par l'emploi de l'aluminium. Comparé au laiton, l'aluminium offre une plus grande résistance aux composés sulfurés existant dans le gaz : ce métal peut donc être substitué au laiton et au bronze, d'autant plus qu'on peut facilement le braser et le polir.

Les tubes d'aluminium de 6 à 15 millimètres de diamètre sont convenables pour les installations de gaz, en ayant soin de ne pas mettre en évidence les joints brasés dont la couleur a été altérée. On a ainsi effectué des installations plus économiques avec des tubes d'aluminium qu'avec des tubes de laiton malgré que les premiers avaient 5 millimètres de diamètre de plus que les seconds. Ces installations sont, en outre, plus rigides et de meilleure apparence; la couleur claire de l'aluminium dispense de frais de décoration. Elles jouissent enfin d'une parfaite immunité aux produits de la combustion du gaz.

Le cuivre étant rapidement attaqué par le gaz sulfureux, l'aluminium a été employé aussi pour les montures de manomètres dans les usines, ainsi que dans les appareils laveurs et purificateurs. Il serait intéressant d'essayer ce métal pour les compteurs.

Monnaies. — Une propriété assez peu connue de l'aluminium est sa *sonorité*: un lingot de ce métal suspendu à un fil et frappé par un corps dur rend un son prolongé d'une pureté comparable à celle du cristal. Cette qualité a permis de fabriquer à l'aide d'alliages (aluminium-vanadium notamment) des instruments de musique; mais elle a donné aussi l'idée d'utiliser le métal pur à la frappe d'une monnaie divisionnaire. En effet, en outre de cette propriété, l'aluminium a une durée et une ténacité comparables à celle de l'argent.

Les pièces faites de ce métal (essais à la Monnaie) s'usent moins rapidement que les pièces d'or, d'argent et de bronze. Leur inaltérabilité, quelles que soient la température, l'humidité, l'acidité plus ou moins grande des milieux dans lesquels elles circulent, enfin leur légèreté, qui permet de ne pas surcharger les porteurs qui en font un usage courant, sont autant de propriétés qui militent en faveur de leur adoption en remplacement de la monnaie de bronze. Il faut cependant tenir compte de ce fait que la densité de l'aluminium étant très faible, on doit, pour ne pas être amené à avoir des pièces de trop forte épaisseur, leur donner un diamètre suffisamment grand. En limitant à 2 et 3 grammes le poids des pièces de 5 et 10 centimes, l'épaisseur serait suffisante sans toutefois être gênante pour le maniement des monnaies d'un usage

constant; les diamètres correspondants sont de 25 et 30 millimètres.

Le gouvernement français a proposé, il y a quelques années, la substitution de l'aluminium au bronze pour cet emploi. Une commission a même été nommée pour la mise au point de la question qui n'est pas encore entièrement résolue. L'étude approfondie de cette réforme a permis d'en dégager des conséquences financières, économiques et pratiques qui amèneront sans doute un jour ou l'autre sa solution. La propreté et la légèreté des pièces, notamment, constitueraient un avantage très apprécié du public.

VI. — Emploi de l'aluminium recouvert de dépôts métalliques ou recouvrant d'autres substances.

Cuivrage de l'aluminium. — On a indiqué plusieurs procédés pour le cuivrage de l'aluminium. Dans celui de Lodiguyne, on emploie une anode de cuivre pur et un électrolyte constitué par de l'eau additionnée de quelques gouttes d'acide sulfurique. Quand le courant a passé pendant quelques instants, il se forme un peu de sulfate de cuivre et c'est de lui que provient le cuivre qui se dépose sur l'aluminium. Au bout d'une demi-heure, on lave bien à l'eau, puis successivement à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique et de soude caustique, enfin dans de l'eau pure. On répète l'opération complète plusieurs fois, jusqu'à ce que l'aluminium soit recouvert d'une couche de cuivre suffisamment épaisse.

Dans le procédé Giroux, le bain a la composition suivante :

Eau distillée.....	10 litres
Carbonate de sodium.....	210 grammes
Bisulfate de sodium.....	200 —
Acétate neutre de cuivre.....	240 —
Cyanure de potassium.....	240 —

On commence par dissoudre le carbonate de sodium dans 6 à 7 litres d'eau distillée chaude et on ajoute peu à peu le bisulfate. L'acétate de cuivre, finement pulvérisé, est dissous par petites quantités et en agitant fortement. Quant au cyanure de potassium,

qui a été dissous séparément dans 3 litres d'eau, on l'ajoute à la solution précédente après complet refroidissement. Le tout est brassé, chauffé et filtré.

Le décapage de l'aluminium se fait en le plongeant pendant un instant dans une solution de cyanure de potassium et en le frottant, après séchage, avec de la pierre ponce. Cette opération de décapage étant d'une grande importance, on la complète en plongeant l'aluminium dans une autre solution chaude, constituée par de la potasse dans laquelle il est laissé jusqu'à ce qu'il se forme quelques bulles gazeuses. Il est lavé à l'eau froide et dans une solution aqueuse de bichlorure de mercure et de cyanure de potassium. L'aluminium est finalement plongé rapidement dans le bain. Le courant employé est de 0,5 ampère environ sous 3 volts.

Nickelage de l'aluminium. — Le nickelage de l'aluminium a toujours été considéré comme une opération difficile; il a été récemment résolu par Canac et Tassily qui conseillent d'agir de la manière suivante :

Le décapage du métal comporte successivement : le passage dans un bain de potasse à l'ébullition suivi d'un brossage avec un lait de chaux, et le trempage pendant quelques minutes dans un bain de cyanure de potassium à 2 pour 1.000. Après passage dans chaque bain, la pièce est lavée à grande eau. Le métal subit ensuite l'action d'un bain chlorhydrique ferrugineux formé de :

Acide chlorhydrique	500 grammes
Eau	500 —
Fer	1 —

On le laisse dans ce bain jusqu'à ce qu'il prenne un aspect particulier rappelant le moiré métallique. Après un dernier lavage à l'eau, la pièce peut recevoir le dépôt de nickel par voie électrolytique. A ce point de vue, l'expérience démontre que les meilleurs résultats sont obtenus avec le chlorure de nickel : le métal résultant de ce traitement se présente avec un aspect blanc mat devenant brillant par le polissage au grattebosse.

L'adhérence du dépôt de nickel sur l'aluminium est très remarquable. On peut marteler ou plier les plaques sans qu'il se forme

de craquelures et c'est seulement par cassure de l'aluminium que celui-ci est mis à nu. Quand on parvient à soulever la couche de nickel, l'arrachement, rapidement limité, ne peut s'effectuer que si l'on exerce un effort appréciable.

L'aluminium nickelé supporte le chauffage jusqu'à la température de fusion de l'aluminium sans que le nickel se sépare.

Si l'on examine au microscope le métal décapé à l'acide chlorhydrique ferrugineux, on constate à sa surface l'existence de cellules dans lesquelles vient se fixer le nickel au cours de l'électrolyse. Il semble que le fer, en formant un réseau à la surface de l'aluminium, donne naissance à une multitude de couples favorisant l'attaque par l'acide chlorhydrique, cette attaque s'effectuant énergiquement mais irrégulièrement; il en résulte cet aspect particulier de la surface de l'aluminium entraînant l'aptitude à fixer les dépôts galvaniques.

L'aluminium nickelé ne s'altère pas à l'air humide et résiste bien à l'action des réactifs chimiques : soude diluée, acide acétique cristallisable, sel marin en solution concentrée, appliqués à froid ou à chaud. Au point de vue du transport de l'énergie électrique, les fils en aluminium nickelé produisent un abaissement du coefficient de dilatation.

Dorure de l'aluminium. — On opère ainsi qu'il suit :

On commence par argenter le métal dans un bain composé de :

Argent.....	20 grammes
Cyanure de potassium.....	60 —
Eau.....	1 litre

L'argent est d'abord dissous dans de l'acide nitrique sans excès, puis on ajoute le cyanure; l'argenteure se fait à froid.

Le bain d'or est préparé avec de l'or dissous à la manière ordinaire et auquel on ajoute :

Or.....	20 grammes
Sulfate de soude.....	20 —
Phosphate de soude.....	660 —
Cyanure de potassium.....	40 —
Eau.....	1 litre

Ce bain doit être utilisé à la température de 20 à 25° environ.

Fer recouvert d'aluminium. — Pour recouvrir d'aluminium des feuilles de fer, plaques ou autres surfaces, de la poudre d'aluminium mélangée à un vernis spécial incolore est appliquée en couches minces sur le métal. L'application se fait à l'aide de rouleaux compresseurs ; les feuilles sont ensuite chauffées assez longtemps, dans un four à moufle, à 125° environ.

Les objets en fer qui doivent être revêtus d'aluminium sont d'abord galvanisés ou étamés et immergés ensuite dans un bain d'aluminium fondu ayant de 700 à 800° C. Dans le bain, les objets sont brossés avec des brosses d'acier. L'étain ou le zinc fond et il est remplacé par l'aluminium. Ils sont traités de cette manière deux ou trois fois dans un bain semblable, mais la plus grande partie de l'étain ou du zinc est absorbée par le premier bain.

Le revêtement d'aluminium ainsi effectué adhère parfaitement au fer ; il ne s'écaille pas, ne se ternit pas, ne se corrode pas sous l'action de l'air humide, de l'eau ou de la chaleur et il ne peut être enlevé par les moyens mécaniques courants.

On recouvre parfois aussi d'aluminium les *fils d'acier* , ce qui permet de réaliser une augmentation de 80 % de la résistance à la flexion.

Dépôts d'aluminium sur des matières quelconques. — Le procédé Schoop pour l'obtention de dépôts métalliques sur des objets quelconques s'applique particulièrement à l'aluminium et peut être considéré comme le complément des méthodes galvaniques. On sait qu'il consiste à projeter le métal fondu et pulvérisé sur les surfaces à recouvrir. La projection du métal est faite à température élevée et sous forte pression (20 à 25 kilogrammes). En sortant de l'appareil, il est réduit à l'état de poudre impalpable, à l'état de brouillard, et se trouve projeté avec violence sur la surface des objets, de sorte que les gouttelettes se déposent sous forme de pellicules extrêmement minces et compactes, les recouvrant ainsi d'une couche adhérente et solide et qui est d'une homogénéité remarquable. L'épaisseur de la pellicule peut varier de 1/30 de millimètre à quelques millimètres suivant la durée de l'opération. Dans le cas de l'aluminium, 8 à 10 secondes suffisent pour obtenir une couche de 6 millimètres d'épaisseur.

Ce procédé peut être employé pour recouvrir d'une couche d'aluminium, non seulement les métaux, mais tout aussi bien le plâtre, l'ébonite, le verre, le bois, le celluloïd, etc. On l'utilise notamment pour le revêtement des bas-reliefs, moulages et toutes œuvres de sculpture, la protection du fer et de l'acier contre la rouille (ponts, charpentes en fer), la métallisation des pièces céramiques et de verrerie d'art, le capsulage et le bouchage des flacons et bouteilles, la fabrication des vases et réservoirs en grès recouvert d'aluminium, des tubes sans soudure, la confection d'objets creux, enfin la fabrication des clichés d'impression, planches pour éditions stéréotypes, galvanos, etc.

Pour cette dernière application, le procédé de métallisation se substitue avantageusement à la méthode galvanique ordinaire applicable seulement aux surfaces conductrices.

Au point de vue de la rapidité, l'avantage est encore en faveur du procédé par métallisation. Les dépôts sont du reste très nets ; les couches peuvent être adhérentes ou non suivant le but de l'opération. La structure du métal n'est pas cristalline et semble plutôt affecter une forme amorphe.

CHAPITRE IV

BRONZES D'ALUMINIUM

Constitution. — L'aluminium forme avec le cuivre une série d'alliages intéressants dont plusieurs sont employés industriellement. On les connaît plus généralement sous le nom de *bronzes d'aluminium*, mais ils ne doivent pas être confondus avec les bronzes à l'aluminium, alliages ayant la composition des bronzes ordinaires (Cu-Sn) additionnés d'une faible quantité d'aluminium (V. Chap. v, p. 147).

Les bronzes d'aluminium sont formés de sept constituants principaux parmi lesquels se trouvent les combinaisons définies Al^2Cu , AlCu , AlCu^3 et AlCu^4 . L'existence de Al^2Cu , AlCu et AlCu^3 a été signalée dès 1895 par H. Le Chatelier à la suite d'études microgra-



FIG. 38. — Bronze d'aluminium à 5,5 % d'aluminium montrant le constituant η ou Al^2Cu ainsi que l'eutectique $\text{Al}-\text{Al}^2\text{Cu}$. Attaque à l'acide chlorhydrique. — Gross. : 50 diam.

phiques sur les alliages de cuivre et d'aluminium. Carpenter et Edwards ont indiqué, en 1907, le composé AlCu^4 , et, la même année, Pouschine, en étudiant la force électromotrice de dissolution de ces alliages, a confirmé l'existence de AlCu . Les

courbes de fusibilité, de conductivité, de densité, de dilatation et la métallographie mettent aisément en évidence la présence de ces constituants dans les alliages cuivre-aluminium de composition déterminée.

Ces combinaisons ont pu être isolées et étudiées en détail par M. L. Guillet ⁽¹⁾, quant à leurs propriétés physiques et chimiques. C'est ainsi que AlCu se présente sous l'aspect d'une très belle poudre grise, de densité égale à 5,76. Le composé Al²Cu (*fig. 38*) a été obtenu en magnifiques cristaux affectant la forme de longues



FIG. 39. — Bronze d'aluminium à 6 % montrant la solution α . Attaque au perchlorure de fer en solution chlorhydrique. — Gross.: 200 diam.

aiguilles prismatiques dont la largeur atteint parfois 2 à 3 centimètres; sa densité est 4,04. Le composé AlCu³ se présente sous forme de poudre de couleur or, très nettement cristallisée; sa densité est 6,73.

L'oxygène n'attaque ces corps qu'à une température élevée, mais alors avec rapidité. L'eau ne les altère pas sensiblement même à haute température. L'acide sulfurique réagit d'autant plus facilement que le pourcentage de cuivre est plus élevé; il se produit un dégagement

de gaz sulfureux et d'hydrogène avec dépôt de soufre provenant de la réduction de l'anhydride sulfureux. L'acide chlorhydrique étendu n'attaque pas AlCu³, mais a une légère action sur AlCu et dissout rapidement Al²Cu. Concentré et chaud, il réagit sur tous ces produits et d'autant plus vite que leur teneur en aluminium est plus élevée. L'acide nitrique agissant à froid dissout immédiatement AlCu³ et AlCu, mais n'agit sur Al²Cu qu'à l'ébullition. L'eau régale dissout ces composés. Un courant de gaz carbo-

(1) L. GUILLÉT, *Contribution à l'étude des alliages d'aluminium*. Typ. Ph. Renouard, Paris.

nique humide donne avec AlCu^3 du carbonate de cuivre, mais ne paraît pas avoir d'action sur AlCu et Al^2Cu . La potasse étendue et froide attaque rapidement Al^2Cu ; concentrée et froide, elle agit sur AlCu ; elle ne produit aucune action sur AlCu^3 même à l'ébullition. Vers 200° , le chlore donne du chlorure d'aluminium et du chlorure cuivrique.

Les sept constituants dont sont composés les alliages cuivre-aluminium se révèlent à l'examen micrographique :

Les alliages renfermant de 0 à 8 % d'aluminium montrent le premier constituant, ou *constituant* α de Guillet (*fig. 39*), formé par une solution cuivre-aluminium; cette dernière apparaît en jaune or par le perchlorure de fer en solution chlorhydrique et par le chlorure de cuivre ammoniacal.

Le *constituant* β appartient surtout aux alliages renfermant de 8,6 à 14,8 % d'aluminium. Après refroidissement lent, ces derniers montrent la présence de α et β , ce dernier étant d'autant plus abondant que le pourcentage d'aluminium est plus élevé.

Il apparaît en masses colorées en noir dans l'attaque au perchlorure de fer ou au chlorure de cuivre. L'alliage à 8,2 % d'aluminium n'en contient que des traces; celui à 9,8 % Al en contient une quantité très importante; celui à 10,5 % Al en montre sur plus des deux tiers de sa surface à l'examen micrographique.

Le *constituant* γ est caractéristique de tous les alliages renfermant de 8,6 à 11,8 % d'aluminium refroidis brusquement à une température supérieure à leur point de transformation.

Entre 11,8 et 23,5 % d'aluminium apparaît le quatrième constituant, ou *constituant* δ . C'est une solution solide (*fig. 40*).



FIG. 40. — Bronze d'aluminium à 22 % d'aluminium montrant le constituant δ . Attaque à l'acide azotique étendu. — Gross. : 200 diam.

Lorsque la teneur en aluminium dépasse 30 $\frac{0}{10}$, on se trouve en présence d'alliages qui, attaqués par la potasse, laissent voir de grands cristallites aux bords arrondis. A 40 $\frac{0}{10}$ d'aluminium, ils changent de forme et prennent l'aspect de longues aiguilles ayant le même caractère. Ce *constituant* α doit, d'après M. Guillet, être le composé AlCu.

Entre 44 et 66 $\frac{0}{10}$ d'aluminium, on se trouve en présence du composé Al²Cu qu'une attaque à l'acide chlorhydrique étendu fait nettement apparaître.

Enfin, pour une teneur en aluminium supérieure à 66 $\frac{0}{10}$, le *constituant principal* H semble être formé par de l'aluminium ou une solution aluminium-cuivre à très faible pourcentage de cuivre.

Propriétés physiques. — Couleur. — La caractéristique physique principale du bronze d'aluminium est sa *couleur*. L'alliage à 4 $\frac{0}{10}$ d'aluminium possède la teinte de l'or à 14 carats, tandis que celui à 3 $\frac{0}{10}$ a la couleur de l'or à 18 carats, c'est-à-dire qu'il est légèrement vert. Cette teinte se conserve jusqu'à la teneur de 14 $\frac{0}{10}$ d'aluminium. Pour des pourcentages supérieurs, le bronze est gris ou blanc d'argent; le changement de coloration correspond nettement au moment où le constituant β disparaît de l'alliage.

Densité. — Elle est naturellement d'autant plus élevée que le pourcentage d'aluminium est faible. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus pour différents alliages préparés par union directe des éléments au creuset (aluminium à 99,65 $\frac{0}{10}$ et cuivre électrolytique) :

ALUMINIUM $\frac{0}{10}$	DENSITÉ	ALUMINIUM $\frac{0}{10}$	DENSITÉ
0 (cuivre pur)	8,80	38,25	4,78
2,05	8,41	42,93	4,43
4,90	8,00	48,00	4,10
10,07	7,45	53,01	3,90
13,05	7,14	57,24	3,70
16,67	6,73	66,40	3,39
21,20	6,43	74,60	3,18
27,03	5,92	87,50	2,85
32,17	5,34	100 (Al pur)	2,60

Ces chiffres sont intéressants parce que, traduits par une courbe, ils confirment l'existence des principaux constituants définis plus haut des alliages de cuivre et d'aluminium, notamment $AlCu^3$ et $AlCu$; il y a en effet deux points d'inflexion pour des teneurs en aluminium voisines de 13 et 30 % auxquelles correspondent ces composés.

Fusibilité. — Le diagramme de *fusibilité* a été établi d'abord par H. Le Chatelier, puis par Campbell et Mathews et, plus récemment, par Carpenter et Edwards. Il montre (fig. 41) une courbe AB for-

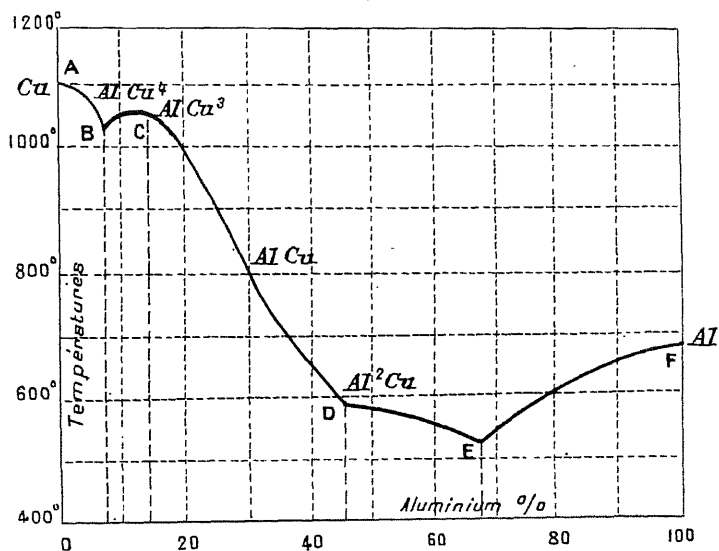


FIG. 41. — Courbe de fusibilité des alliages aluminium-cuivre.

tement incurvée, une branche BD accusant un maximum en C, et deux autres branches DE et EF. La position des constituants définis $AlCu$, Al^2Cu , $AlCu^3$ et $AlCu^4$, qui correspondent presque tous à des variations brusques de la température de fusion de l'alliage, est nettement mise en évidence sur cette courbe.

Elle confirme d'une façon particulièrement probante cette loi de la fusion des alliages : qu'un alliage est parfois plus fusible que le plus fusible des métaux qui le composent. C'est le cas des alliages

cuivre-aluminium contenant de 40 à 95 % d'aluminium qui fondent au-dessous de 650°, point de fusion de l'aluminium pur.

Quoique facilement fusibles, les bronzes d'aluminium présentent certaines difficultés lorsqu'on les emploie pour le moulage ; ils se signalent en effet par une forte *contraction* au refroidissement. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus pour des alliages contenant de 0,1 % à 12,4 % d'aluminium, entre leur point de fusion et la température ordinaire :

Aluminium.	Contraction linéaire.
0,10 %	2 %
4,05	2,08
8,12	2,33
8,67	2,34
9,90	1,83
12,40	1,83

Il convient donc de préparer les moules en conséquence, pour éviter les suites fâcheuses de cette contraction. A l'état liquide, par contre, le bronze d'aluminium remplit les moules les plus délicats, pénétrant facilement les cavités les plus fines, et se conduisant ainsi presque aussi bien que les bronzes de statuaire. Dans les pièces massives, il est néanmoins susceptible de tassement, ce qui exige l'application de jets abondants et de fortes masselottes,

Résistivité. — Au point de vue de la *résistivité électrique*, on constate les faits suivants :

1° Elle croît avec la teneur en aluminium jusqu'à 7,5 % de ce métal, alliage pour lequel elle est maximum ; elle décroît ensuite. Pour l'alliage à 94 % d'aluminium, elle se rapproche beaucoup de celle de ce métal pur ;

2° Le coefficient de température principal diminue quand la teneur en aluminium augmente, jusqu'à 10 %. A 94 % de ce métal, il est voisin de celui de l'aluminium pur ;

3° L'addition de faibles quantités d'aluminium au cuivre augmente très sensiblement la *résistivité* de ce métal ; par contre, l'addition de faibles quantités de cuivre à l'aluminium ne modifie qu'à peine la *résistivité* de ce dernier.

Ces irrégularités apparentes sont sans doute en rapport avec la présence des constituants des alliages cuivre-aluminium dont la résistivité propre modifie celle de l'alliage dans lequel ils entrent en plus ou moins grande proportion.

Voici, d'autre part, d'après M. Pécheux, les résultats obtenus avec des bronzes d'aluminium à teneurs variées en aluminium. La résistivité ρ y est exprimée en microhms-centimètre :

Propriétés mécaniques. — Les propriétés mécaniques des bronzes d'aluminium varient suivant le pourcentage de leurs éléments, cuivre et aluminium.

L'alliage le plus intéressant est celui à 9 ou 10 % d'aluminium qui, simplement fondu, possède une résistance supérieure à celle de la plupart des corps métalliques. A ce point de vue, il présente les analogies les plus grandes avec l'acier Bessemer de Suède à 0,35 % de carbone. Comme le montrent les chiffres ci-dessous, la *ténacité*, la *limite élastique* et les *allongements* ont à peu près la même valeur et, fait assez curieux, la structure interne des deux alliages présente aussi de grandes analogies, les constituants étant dans les deux cas de dureté inégale :

	Limite d'élasticité (1)	Ténacité	Allongements
Acier à 0,35 % C.....	24 ^{kg}	59 ^{kg} , 9	26 %
Bronze d'aluminium à 9,9 % Al.	23,3	60	28,8

(1) Rappelons que la *limite élastique* à la traction est la charge maximum que peut supporter un métal sans déformation permanente, c'est-à-dire au delà de laquelle il ne peut reprendre ses dimensions primitives après suppression de la charge; elle s'exprime en « kilogrammes par millimètre carré de section ». La *ténacité*, encore appelée *résistance à la traction*, *charge de rupture*, *résistance*